

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

**XXIII ЩОРІЧНА  
НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ  
ІНСТИТУТУ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
НАН УКРАЇНИ**

(Київ, 01 - 05 лютого 2016 року)

Тези доповідей

Київ 2016

УДК [539.1/2+533.9+577.3+621.039](477)(042.5)  
ББК 22.36/38(4Укр)я9+22.333(4Укр)я9+28.071(4Укр)я9+31.4(4Укр)я9  
Д 22

Укладач: І. П. Дрозд

### Програмно-організаційний комітет конференції:

І. П. Дрозд – голова комітету  
В. В. Тришин – заступник голови комітету (радіобіологія та радіоекологія)

#### Члени:

С. М. Федоткін – теоретична ядерна фізика  
А. П. Лашко – експериментальна ядерна фізика  
В. М. Павлович – атомна енергетика  
В. Й. Сугаков – радіаційна фізика та радіаційне матеріалознавство  
О. А. Федорович – фізика плазми  
А. І. Липська – радіобіологія та радіоекологія  
Н. Л. Дорошко – учений секретар ІЯД НАН України  
Т. В. Ковалінська – голова ради молодих учених ІЯД НАН України  
В. В. Луценко – розробник Web-сторінки  
О. Д. Григоренко – видання тез

#### Секретарі:

О. О. Бурдо, О. С. Бурдо, Д. В. Касперович, Т. О. Маргітич, О. М. Пугач

*Друкується за рішенням вченої ради інституту від 27.10.15.*

Д 22 **XXIII** щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 01 - 05 лютого 2016 року) : тези доповідей. - Київ : Ін-т ядерних дослідж., 2016. - 236 с.

ISBN 978-966-02-7820-2

У збірнику опубліковано тези конференції, що є підбиттям підсумків наукової діяльності інституту за 2015 р. Представлено тези з основних напрямків роботи Інституту, а саме: ядерної фізики, атомної енергетики, радіаційної фізики та радіаційного матеріалознавства, фізики плазми та теорії ядерного синтезу, радіоекології та радіобіології.

Наукове видання буде корисним для наукових працівників, аспірантів, інженерів, а також для викладачів та студентів старших курсів вузів.

УДК [539.1/2+533.9+577.3+621.039](477)(042.5)

ББК 22.36/38(4Укр)я9+22.333(4Укр)я9+28.071(4Укр)я9+31.4(4Укр)я9

ISBN 978-966-02-7820-2

© Інститут ядерних досліджень  
НАН України, 2016

# ЗМІСТ

## Секція 1. Ядерна фізика

|   |    |
|---|----|
| <b>Вихровий рух нуклонів при ізоскалярних дипольних збудженнях важких ядер</b>  |    |
| <i>В. І. Абросімов, О. І. Давидовська</i> .....   | 19 |
| <b>Параметризація хвильової функції дейтрона в імпульсному представленні</b>  |    |
| <i>І. І. Гайсак, В. І. Жаба</i> .....   | 19 |
| <b>Обчислення середніх кутових моментів та їхніх систематик у первинних фрагментах поділу з використанням ізомерних відношень</b>                       |    |
| <i>О. М. Горбаченко, О. М. Ткач, В. А. Плюйко, О. І. Давидовська, К. М. Солодовник, Б. М. Бондар</i> .....  | 21 |
| <b>Surface corrections to the semiclassical shell-structure moment of inertia</b>   |    |
| <i>D. V. Gorpichenko, A. G. Magner, J. Bartel, J. P. Blocki</i> .....   | 22 |
| <b>Опис кореляцій тотожних нуклонів в адіабатичній тричастинковій моделі</b>  |    |
| <i>В. В. Гриньов, Б. Ю. Даниловська, Р. М. Плекан, В. Ю. Пойда</i> .....  | 23 |
| <b>Энергетические спектры протонов в дифракционном развале дейтронов ядрами <math>^{208}\text{Pb}</math> при энергии 56 МэВ</b>                         |    |
| <i>В. В. Давидовский, А. Д. Фурса</i> .....   | 25 |
| <b>Розподіл уламків поділу високозбуджених ядер по кінетичній енергії та масі</b>   |    |
| <i>В. Ю. Денисов, Т. О. Маргітич</i> .....  | 26 |
| <b>Комбіновані атомно-ядерні розпади</b>  |    |
| <i>О. Я. Дзюблик</i> .....  | 27 |
| <b>Апроксимація хвильової функції в координатному представленні і радіальні моменти дейтрона</b>  |    |
| <i>В. І. Жаба</i> .....   | 28 |
| <b>Розподіли уламків поділу актинідних ядер за масою та енергією</b>  |    |
| <i>Ф. О. Іванюк</i> .....   | 29 |
| <b>Бета-распад <math>^{125}\text{I} \rightarrow ^{125}\text{Te}</math></b>  |    |
| <i>А. А. Куртєва</i> .....  | 31 |
| <b>Shear viscosity in a system of interacting nucleons</b>  |    |
| <i>A. G. Magner, U. V. Grygoriev, M. I. Gorenstein, V. A. Plujko</i> .....  | 32 |
| <b>Semiclassical shell structures in the radial power-law potentials</b>  |    |
| <i>A. G. Magner, M. V. Koliiesnik, K. Arita</i> .....   | 33 |
| <b>Оболонкові ефекти та спектри (масові, зарядові) уламків поділу ізотопів <math>\text{Np}</math>, <math>\text{Pu}</math> та <math>\text{Am}</math></b> |    |
| <i>В. Маслюк, М. Романюк, О. Парлаг, Т. Маринець</i> .....  | 34 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Особливості виходів уламків поділу надтяжких <math>Z = 118, 130</math> ядер</b><br><i>В. Маслюк, М. Романюк, О. Парлаг, Т. Маринець</i> .....   | 36 |
| <b>Дослідження потенціалу ядерно-ядерної взаємодії у рамках методу подвійної згортки</b><br><i>В. О. Нестеров, В. Ю. Денисов</i> .....   | 37 |
| <b>Комп'ютерне моделювання властивостей SUSY частинок за допомогою експериментальних даних RUN I LHC</b><br><i>Т. В. Обіход</i> .....  | 38 |
| <b>Бозон Хіггса і фізика за межами стандартної моделі</b><br><i>Т. В. Обіход</i> .....   | 38 |
| <b>Использование метода временного анализа в ядерных реакциях вблизи изолированных резонансов, искаженных нерезонансным фоном</b><br><i>С. А. Омельченко, В. С. Ольховский</i> .....   | 39 |
| <b>Характеристики ядерного поділу в рамках немарківської теорії Крамерса</b><br><i>С. В. Радіонов</i> .....  | 40 |
| <b>Сечение фотоэффекта, усредненное по атомным электронам</b><br><i>С. Н. Федоткин</i> .....   | 41 |
| <b>Система тестування мікроструктурних газових детекторів</b><br><i>С. Барсук, О. Безиийко, Л. Голінка-Безиийко, І. Каденко, В. Крилов, М. Тітов</i> .....   | 42 |
| <b>Prompt gamma-rays from interactions of 14 MeV neutrons with nickel</b><br><i>В. М. Bondar, О. М. Gorbachenko, І. М. Kadenko, В. Yu. Leshchenko, V. A. Plujko, K. M. Solodovnyk</i> .....  | 43 |
| <b>Щодо можливостей генерації радіонукліда <math>^{99}\text{Mo}</math> нейтронами на пучку прискорювача</b><br><i>Г. М. Вереміченко, І. П. Дряпаченко, О. В. Коваленко, М. Ф. Коломісць, О. А. Кушій, В. П. Левченко, В. В. Осташко, Ю. М. Павленко, А. Ф. Шаров, В. М. Шевель</i> ..... | 44 |
| <b>Измерение КВК внутривращационного <math>M1</math>-перехода в <math>^{181}\text{Ta}</math></b><br><i>И. Н. Вишевский, С. С. Драпей, В. А. Желтоножский, А. Н. Саврасов, В. П. Хоменков</i> .....   | 45 |
| <b>Напряцювання <math>^{179\text{m}2}\text{Hf}</math> в <math>(\alpha, p)</math>, <math>(\gamma, n)</math> та <math>(n, \gamma)</math>-реакціях</b><br><i>І. М. Вишевський, В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов</i> .....  | 46 |
| <b>Низкофононый детектор нейтронов и гамма-квантов</b><br><i>А. Ш. Георгадзе, В. М. Павлович</i> .....   | 47 |
| <b>Розсіяння дейтронів з енергією 45 MeV ядрами <math>^{12}\text{C}</math></b><br><i>В. І. Гранцев, К. К. Кісурін, С. Є. Омельчук, О. А. Понкратенко, Ю. С. Рознюк, Б. А. Руденко, Л. І. Слюсаренко, Б. Г. Стружко</i> .....   | 48 |
| <b>Порівняння журналу ІЯД НАН України «Ядерна фізика та енергетика» з іншими журналами</b><br><i>О. Д. Григоренко, В. І. Третяк</i> .....  | 49 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Визначення параметрів резонансу <math>^{52}\text{Cr}</math> з набору перерізів, отриманих шляхом зсуву середньої енергії фільтрованих нейтронів</b><br><i>О. О. Грицай, А. К. Гримало, В. А. Пшеничний</i> .....  | 50 |
| <b>Випромінювання нейтронів з ядер <math>^9\text{Be}</math> при анігіляції позитронів зі зв'язаними атомними електронами</b><br><i>В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов</i> .....   | 50 |
| <b>Исследование изомерных отношений <math>^{97\text{m.g}}\text{Nb}</math> при фотоделении <math>^{235}\text{U}</math> и <math>^{238}\text{U}</math></b><br><i>В. А. Желтоножский, А. Н. Саврасов, Е. Н. Солодовник, В. А. Плюйко, А. Н. Горбаченко, О. И. Давидовская</i> .....  | 51 |
| <b>Расчет методом Монте Карло огибающей пучка тяжелых ионов, ускоряемых на тандем-генераторе ЭГП-10К</b><br><i>Г. Г. Заикин</i> .....  | 52 |
| <b>Розрядка <math>^{178\text{m}2}\text{Hf}</math> ізомера, стимулювана низькоенергетичними гамма-квантами, підтверджується – що далі?</b><br><i>В. І. Киришук</i> .....  | 53 |
| <b>Поиск солнечных аксионов резонансно-ядерным методом</b><br><i>В. В. Кобычев</i> .....   | 54 |
| <b>Автоматизована система керування установкою для одержання радіоізотопів на циклотроні У-240</b><br><i>О. М. Ковальов, О. О. Гаврилов, О. В. Дубінін, А. І. Устинов, А. П. Войтер, Л. В. Михайлов, А. І. Піскарьов</i> .....   | 55 |
| <b>Дизайн мікростріпового металевого детектора для моніторингу положення та профілю пучка на прискорювачі РНП (LAL, Orsay)</b><br><i>О. С. Ковальчук, С. Я. Барсук, П'єр Луїс Андре Леперк, В. М. Міліція, В. М. Пугач, Д. І. Сторожик, А. Фаус-Гольф, О. А. Федорович</i> ..... | 56 |
| <b>Двухкамерный источник легких ионов циклотрона У-240</b><br><i>А. И. Колосов, Л. В. Михайлов</i> .....   | 57 |
| <b>Енергії и интенсивности <math>\gamma</math>-переходов в распаде <math>^{137}\text{Cs}</math></b><br><i>В. Т. Купряшкин</i> .....  | 57 |
| <b>Прецизійні вимірювання енергії гамма-променів із розпаду <math>^{122}\text{Sb}</math></b><br><i>А. П. Лашко, Т. М. Лашко</i> .....  | 58 |
| <b>Кремнієва трекінгова система експерименту СВМ</b><br><i>А. О. Лиманець, О. Ю. Охріменко</i> .....   | 60 |
| <b>Метод розв'язання протиріч в БОЯД</b><br><i>В. А. Лібман, О. О. Грицай</i> .....  | 60 |
| <b>Аналіз точності фотонейтронних перерізів, одержаних на квазімонохроматичних гамма-пучках</b><br><i>В. М. Мазур, З. М. Біган, П. С. Деречкей, І. Ю. Сейка, В. В. Гриньов, С. І. Вучкан</i> .....   | 61 |
| <b>Реакція <math>^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{B})^{12}\text{C}</math> та потенціал взаємодії ядер <math>^{12}\text{B} + ^{12}\text{C}</math></b><br><i>С. Ю. Межсевич, А. Т. Рудчик, К. Русек, Є. І. Коций, А. А. Рудчик, С. Б. Сакута, А. Щурек</i> .....            | 62 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Корельованість руху електрона «струсу» із позитроном при <math>\beta^+</math>-розпаді</b>  |    |
| <i>М. Ф. Митрохович</i> .....   | 63 |
| <b>Можливості одержання радіонуклідів на внутрішньому пучку циклотрона У-240, який широко використовується в ядерній медицині</b>   |    |
| <i>Л. В. Михайлов</i> .....   | 64 |
| <b>Опромінювальна установка для напрацювання ізотопів стронцію-82 на ізохронному циклотроні У-240</b>   |    |
| <i>Л. В. Михайлов</i> .....   | 65 |
| <b>512-канална детекторна система реєстрації та обробки рентгенограм при дослідженні швидкоплинних процесів в металах при нагріванні та охолодженні</b>   |    |
| <i>В. М. Міліція, В. В. Бурдін, О. С. Ковальчук, О. Ю. Охріменко, В. М. Пугач, Д. І. Сторожик</i> .....   | 65 |
| <b>Дослідження збору заряду в мікростріпових сенсорах для кремнієвої трекової системи експерименту СВМ</b>  |    |
| <i>С. Л. Момот, Й. Хойзер, М. А. Теклішин, В. М. Пугач</i> .....  | 66 |
| <b>Дослідження характеристик альфа-випромінювання «старих» радіоекологічно-небезпечних джерел ізотопів ядерних матеріалів</b>   |    |
| <i>А. П. Осипенко, М. М. Осипенко</i> .....   | 67 |
| <b>Вимірювання диференційних поперечних перерізів утворення <math>V^0</math>-частинок у протон-ядерних зіткненнях при енергії 5 ТеВ</b>   |    |
| <i>О. Ю. Охріменко, В. М. Пугач, І. О. Костюк, Є. Петренко</i> .....  | 68 |
| <b>Система радіаційного моніторингу експерименту ЛНСь в умовах протон-протонних зіткнень з енергією 13 ТеВ</b>  |    |
| <i>О. Ю. Охріменко, В. М. Пугач, Ф. Алессіо, Р. Якобссон</i> .....  | 68 |
| <b>Розсіяння протонів ядрами <math>^{11}\text{B}</math> та реакція <math>^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}</math> при енергії 3,75 МеВ</b>  |    |
| <i>Ю. М. Павленко, О. К. Горпинич, А. В. Степанюк, Ю. Я. Карлишев, Т. О. Корзина, Д. В. Касперович, Л. Л. Дулгер</i> .....  | 69 |
| <b>Дослідження характеристик сцинтиляційного альфа, гамма-спектрометра</b>  |    |
| <i>О. М. Парлаг, В. О. Мартишукін, В. І. Жаба, А. П. Осипенко, І. Ю. Сийка</i> .....  | 69 |
| <b>Вивчення незв'язаних рівнів ядер з реакцій чотиричастинкового розвалу</b>  |    |
| <i>О. М. Поворозник, О. К. Горпинич</i> .....   | 70 |
| <b>Пошук подвійного бета-розпаду <math>^{116}\text{Cd}</math> (експеримент Augra)</b>   |    |
| <i>О. Г. Поліщук, А. С. Барабаш, П. Беллі, Р. Бернабей, Я. В. Васильєв, Ф. А. Даневич, С. Д'Анжело, А. Інчікитті, Ф. Каппелла, В. Карачіоло, В. В. Кобичев, С. І. Коновалов, М. Лаубенштейн, В. М. Мокіна, Д. В. Пода, В. І. Третьак, В. І. Уматов, Д. М. Черняк, Р. Черуллі, В. М. Шлегель</i> ..... | 71 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Енергетична залежність дифракційної структури пружного розсіяння важких іонів на легких ядрах</b>  |    |
| <i>О. А. Понкратенко, Вал. М. Пірнак, А. А. Рудчик, А. Т. Рудчик, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма</i> .....   | 72 |
| <b>Метрологія макровеличин у ядерній гамма-спектрометрії рядів <math>^{238}\text{U}</math>, <math>^{232}\text{Th}</math>, <math>^{235}\text{U}</math></b>   |    |
| <i>О. М. Поп, М. В. Стець, В. Т. Маслюк</i> .....   | 73 |
| <b>Красива та чарівна фізика експерименту LHCb</b>  |    |
| <i>В. М. Пугач</i> .....  | 74 |
| <b>Комбінований барельний та форвардний трекінг у MVD-детекторі експерименту Panda</b>  |    |
| <i>М. В. Пугач, С. Горбунов, І. Кисель</i> .....  | 75 |
| <b>Пружне та непружне розсіяння іонів <math>^{15}\text{N}</math> ядрами <math>^7\text{Li}</math> при енергії 81 МеВ у порівнянні з розсіянням <math>^{14}\text{N} + ^7\text{Li}</math></b>  |    |
| <i>А. Т. Рудчик, Л. М. Муравинець, Є. І. Коцый, Е. П'ясецькі, К. Русек, А. Трціньська, Вал. М. Пірнак, А. А. Рудчик, О. А. Понкратенко, В. А. Плюйко, С. Б. Сакута, А. Столяж, І. Строек, А. Щурек</i> .....  | 76 |
| <b>Процедури преобразовання дискретних одномерних даних при переведенні їх з однієї сітки аргументів на другу</b>   |    |
| <i>А. М. Соколов</i> .....  | 77 |
| <b>Порівняльний аналіз взаємодії іонів <math>^{18}\text{O}</math> з ядрами <math>^7\text{Li}</math> та <math>^6\text{Li}</math> при енергії 114 МеВ з врахуванням пружного, непружного розсіяння та реакцій одноступінчастих передач</b>              |    |
| <i>Ю. М. Степаненко, С. Ю. Межєвич, О. А. Понкратенко, А. А. Рудчик, А. Т. Рудчик, В. В. Улещенко, К. А. Черкас</i> .....   | 78 |
| <b>Формування та моніторинг міні-пучкових структур для просторово фракціонованої радіаційної терапії</b>  |    |
| <i>Д. І. Сторожик, Є. Л. Момот, О. С. Ковальчук, О. Ю. Охріменко, Й. Презадо, В. М. Пугач</i> .....   | 79 |
| <b>Дослідження роботи кремнієвих мікροстріпових детекторів трекової системи майбутнього експерименту CBM (FAIR)</b>   |    |
| <i>М. А. Теклішин, В. Добіщук, Є. Л. Момот, В. М. Пугач, Й. Хойзер</i> ....   | 80 |
| <b>Пошук <math>2\beta</math> розпаду <math>^{106}\text{Cd}</math> зі збагаченим кристалічним сцинтилятором <math>^{106}\text{CdWO}_4</math> у режимі збігів з чотирма HPGe детекторами</b>  |    |
| <i>В. І. Третьяк, П. Беллі, Р. Бернабей, В. Б. Бруданін, Ф. А. Даневич, С. Д'Анжело, А. ді Марко, А. Інчікитті, Ф. Капелла, В. Карачіолло, М. Лаубенштейн, В. М. Мокіна, Д. В. Пода, О. Г. Поліщук, І. А. Тупіцина, Д. М. Черняк, Р. Черулі</i> ..... | 81 |
| <b>Пошук довгоіснуючого надважкого елемента ека-вольфрам з радіоактивно-чистим кристалічним сцинтилятором <math>\text{ZnWO}_4</math></b>  |    |
| <i>В. І. Третьяк, П. Беллі, Р. Бернабей, Ф. А. Даневич, А. Д'Анжело, В. Ю. Денисов, А. Інчікитті, Ф. Капелла, В. В. Кобичев, Д. В. Пода, О. Г. Поліщук, Р. Черулі</i> .....   |    |

|  |    |
|--|----|
| <b>Моделювання криогенних сцинтиляційних болометрів з кристалами <math>Zn^{100}MoO_4</math> для пошуку <math>0\nu 2\beta</math> розпаду ядра <math>^{100}Mo</math> в установці Edelweiss</b> | 82 |
| <i>Д. М. Черняк, В. В. Кобичев</i> .....   | 82 |
| <b>О равноправном статусе бозонных и фермионных состояний спирного поля для дублета частица-античастица спина <math>s = 1/2</math></b>   |    |
| <i>И. Ю. Кривский, Т. М. Заяц, С. Г. Шпырко</i> .....  | 83 |
| <b>Секція 2. Атомна енергетика</b>   |    |
| <b>Изучение возможности возникновения, развития и свойств самоподдерживающейся цепной ядерной реакции в топливосодержащих массах объекта «Укрытие»</b>                                       |    |
| <i>В. А. Бабенко, В. Н. Павлович</i> .....   | 86 |
| <b>Верифікація розрахунків, які виконуються програмними засобами дозиметрії зразків-свідків і корпусів реакторів ВВЕР</b>  |    |
| <i>В. М. Буканов, В. В. Львович, В. Л. Демьохін, О. В. Грищенко, С. М. Пугач</i> .....   | 87 |
| <b>Аналіз поведінки відпрацьованого ядерного палива в понадпроектний період зберігання</b>   |    |
| <i>В. В. Гальченко</i> .....   | 88 |
| <b>Методики отримання гомогенізованих макроскопічних перерізів</b>   |    |
| <i>В. В. Гальченко, А. А. Мішин</i> .....  | 89 |
| <b>Зміцнення фізичної ядерної безпеки – суворя необхідність сьогодення</b>   |    |
| <i>В. І. Гаврилюк, А. В. Гаврилюк-Буракова, С. С. Драпей, О. П. Романова</i> .....   | 90 |
| <b>Комплексе інженерно-технічних засобів системи фізичного захисту як інструмент підвищення ефективності систем фізичного захисту ядерних установок та ядерних матеріалів</b>                |    |
| <i>В. І. Гаврилюк, С. С. Драпей, О. О. Левіна, В. В. Пархоменко, О. П. Романова, А. В. Самсоненко</i> .....  | 91 |
| <b>Оцінка катастрофічних ризиків і збитків методом Монте-Карло</b>   |    |
| <i>М. М. Гаврилюк, С. І. Азаров</i> .....  | 92 |
| <b>Розрахунок вкладу температурного старіння в радіаційне окрихчування корпусних сталей енергоблоків АЕС України</b>   |    |
| <i>М. Г. Голяк, Л. І. Чирко, Ю. С. Гульчук</i> .....   | 93 |
| <b>Використання методів шумової діагностики для визначення параметрів безпеки ВВЕР</b>   |    |
| <i>В. В. Горанчук, В. І. Борисенко</i> .....   | 95 |
| <b>Дослідження властивостей радіаційного захисту бетонних конструкційних матеріалів АЕС за допомогою Монте Карло коду Serpent</b>  |    |
| <i>В. І. Гулік</i> .....   | 96 |



|  |     |
|--|-----|
| <b>Коефіцієнти запаса для флюенсов нейтронів в роботах по оцінці безпеки АЕС</b>   |     |
| <i>В. Л. Демехин, А. М. Пугач, А. В. Гриценко</i> .....  | 96  |
| <b>Аналіз методів і алгоритмів, що використовуються при оцінках ефективності СФЗ</b>                                       |     |
| <i>В. М. Євланов, С. І. Азаров</i> .....   | 97  |
| <b>Порівняння культури ядерної безпеки та ядерної захищеності</b>  |     |
| <i>В. М. Євланов, С. І. Азаров</i> .....   | 99  |
| <b>Проблеми чутливих конструктивних елементів датчиків контролю аварійних процесів</b>                                     |     |
| <i>В. М. Євланов, І. М. Вишневецький, С. І. Азаров</i> .....   | 100 |
| <b>Стан кваліфікації обладнання АЕС України і шляхи подальшого прогресу цих радіаційних технологій</b>                     |     |
| <i>Т. В. Ковалінська, І. А. Остапенко, В. І. Сахно</i> .....   | 101 |
| <b>Використання альфа-активності радіатора камери поділу для контролю працездатності нейтронного вимірювального каналу</b> |     |
| <i>О. А. Кучмагра, Г. І. Одинокін, А. С. Садовніков, С. М. Стадник, А. Д. Скорбун</i> .....                                | 102 |
| <b>Реактори на хвилі ядерних поділів. Досягнення і перспективи</b>   |     |
| <i>В. М. Павлович</i> .....  | 103 |
| <b>Метод прогнозування разгерметизації ТВЭЛов ВВЭР с учетом распределения энерговыделения в ТВС</b>                        |     |
| <i>С. Н. Пельх, М. В. Максимов</i> .....   | 103 |
| <b>Вплив параметрів активної зони ВВЕР-1000 на формування сигналу ДПЗ</b>  |     |
| <i>Ю. Ф. Піонтковський, В. І. Борисенко</i> .....  | 104 |
| <b>Нормативні аспекти матеріалознавчого супроводу безпечної експлуатації корпусів реакторів ВВЕР-1000</b>                  |     |
| <i>В. М. Ревка, Л. І. Чирко</i> .....  | 105 |
| <b>Критическое поведение нейтронов и распределение Ферми</b>   |     |
| <i>В. В. Рязанов</i> .....   | 106 |
| <b>Визначення коефіцієнтів реактивності ВВЕР-1000 в програмному коді MCNP</b>  |     |
| <i>М. М. Сапон, В. І. Борисенко</i> .....  | 107 |
| <b>Статистичний аналіз шумів реакторного обладнання на основі теорії гіпервипадкових явищ та кореляційного аналізу</b>     |     |
| <i>А. Д. Скорбун, С. М. Стадник, В. Г. Котеленець</i> .....  | 108 |
| <b>Аналіз різних підходів при визначенні зсуву критичної температури крихкості для металів КР ВВЕР-1000</b>                |     |
| <i>О. В. Тригубенко, В. М. Ревка, Ю. В. Чайковський, Л. І. Чирко</i> .....   | 109 |
| <b>Экспертная оценка риска отказа газотурбинной установки</b>  |     |
| <i>А. Н. Харабет, О. Е. Зотеев, О. А. Чулкин, В. О. Зотеев</i> .....   | 110 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Порівняння Монте Карло моделювання і одноступової дифузійної моделі для хвилі ядерних поділів</b>  |     |
| <i>В. М. Хотяїнцев, О. М. Хотяїнцева, В. І. Гулік, В. М. Павлович</i> .....   | 111 |
| <b>Рівняння динаміки реактора з уповільнюючим впливом запізнювальних нейтронів</b>  |     |
| <i>В. М. Хотяїнцев, А. В. Аксьонов</i> .....  | 112 |
| <b>Використання нового експериментального обладнання INSTRON для визначення механічних властивостей конструкційних матеріалів</b>                                   |     |
| <i>Ю. В. Чайковський, В. М. Ревка, Л. І. Чирко</i> .....  | 113 |
| <b>Створення алгоритму та написання програми для побудови залежностей зсуву температури крихко-в'язкого переходу та критичної температури крихкості від флюенса</b> |     |
| <i>О. В. Шкапяк, Л. І. Чирко, В. М. Ревка, Ю. В. Чайковський</i> .....  | 114 |

**Секція 3. Радіаційна фізика  
та радіаційне матеріалознавство**

|  |     |
|--|-----|
| <b>Лазерні прискорювачі протонів: перспективи використання для радіаційної терапії раку (огляд)</b>  |     |
| <i>І. Є. Анохін</i> .....  | 116 |
| <b>Структурні зміни в кремнії, опромінену високоенергетичними дейтронами та протонами</b>  |     |
| <i>В. І. Варніна, Л. С. Марченко, М. Б. Пінковська,<br/>М. І. Старчик, Г. Г. Шматко</i> .....  | 117 |
| <b>Залежність спектрів екситонів Ваньє від ширини бар'єрного шару для електрона в зоні провідності в напівпровідникових гетероструктурах II типу</b> |     |
| <i>Г. В. Верцімаха</i> .....   | 118 |
| <b>Електростатичні пастки для непрямих екситонів у подвійних квантових ямах між електродами скінчених розмірів</b>                                   |     |
| <i>Г. В. Верцімаха, І. Ю. Голіней</i> .....  | 119 |
| <b>Дослідження <i>in situ</i> ефектів опромінення в конструкційних матеріалах</b>  |     |
| <i>І. М. Вишневецький, Л. І. Чирко, В. М. Ревка</i> .....  | 120 |
| <b>Теорія ефективної діелектричної проникності діелектрика зі сферичними металевими наночастинками з використанням трансфер-матриць</b>              |     |
| <i>І. Ю. Голіней</i> .....   | 121 |
| <b>Роль межузельних атомів кремнія в конфігураційній перестройке дивакансій в кластерах дефектів</b>   |     |
| <i>А. П. Долголенко</i> .....  | 122 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Розробка нових радіаційних технологічних процесів для індустрії</b>   |     |
| <i>Т. В. Ковалінська, І. А. Остапенко, В. І. Сахно, А. Г. Зелінський,<br/>Н. В. Халова, А. М. Файнлейб, І. Ю. Даниленко, Ю. М. Колесник.....</i> | 123 |
| <b>Quantum chaos and level statistics in electron-phonon systems</b>   |     |
| <i>Е. Majernikova, S. Shpyrko.....</i>   | 124 |
| <b>Акустостимульовані процеси релаксації у вихідних та опромінених світлодіодах GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub></b>                              |     |
| <i>Є. В. Малий, М. В. Литовченко, Я. М. Оліх,<br/>І. В. Петренко, В. П. Тартачник.....</i>   | 125 |
| <b>Дослідження впливу опромінення електронами з енергією 10 MeV на оптичні та люмінесцентні властивості кристалів CaF<sub>2</sub></b>            |     |
| <i>В. Маслюк, І. Мезела, Т. Вієру-Васіліца, І. Роман.....</i>  | 127 |
| <b>Аналіз отриманого досвіду, проблем та шляхів подальшого розвитку прикладних технологічних досліджень в секторі радіаційних технологій</b>     |     |
| <i>В. І. Сахно, Т. В. Ковалінська, І. А. Остапенко, А. Г. Зелінський,<br/>Є. Г. Міхнєва, Н. В. Халова, О. А. Жернов.....</i>                     | 127 |
| <b>Структура та фононні спектри нанорозмірних частинок твердих розчинів на основі діоксиду цирконію</b>  |     |
| <i>В. І. Слісенко, В. О. Зотєєв, О. А. Василькевич,<br/>О. Є. Зотєєв, В. В. Кротенко.....</i>  | 128 |
| <b>Утворення конденсованих фаз екситонів під дією просторово-модульованого лазерного опромінення</b>   |     |
| <i>В. Й. Сугаков, В. В. Томилко.....</i>   | 129 |
| <b>Від'ємний диференційний опір у світлодіодах GaP</b>   |     |
| <i>В. П. Тартачник, Є. В. Малий, Г. П. Гайдар,<br/>О. В. Конорева, М. Б. Пінковська.....</i>   | 130 |

**Секція 4. Теорія ядерного синтезу  
та фізика плазми**

|  |     |
|--|-----|
| <b>Напруженість електричного поля позитивного стовпа дугового розряду між мідними та графітовими електродами</b> |     |
| <i>А. М. Веклич, С. О. Фесенко, В. Ф. Борецький, М. М. Клешич.....</i>   | 132 |
| <b>Дослідження плазми електродугового розряду між Cu-Ni електродами</b>  |     |
| <i>А. М. Веклич, М. М. Клешич, С. О. Фесенко, В. Ф. Борецький.....</i>   | 133 |
| <b>Нестійкість просторового розподілу концентрації в геліконному розряді з лінійною збуджуючою системою</b>      |     |
| <i>В. Ф. Вірко, Ю. В. Вірко, В. М. Слободян.....</i>   | 135 |
| <b>Плазмова активація каталізаторів синтезу рідких органічних речовин з синтез-газу</b>                          |     |
| <i>Д. К. Гамазін, В. В. Юхименко, В. Я. Черняк,<br/>В. А. Бартишевський, Р. В. Корж, Е. В. Мартиш.....</i>       | 136 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Мас-спектрометричні дослідження складу плазми</b>   |     |
| <b>ВЧ-розряду в галогеновмісних газах</b>  |     |
| <i>В. В. Гладковський, Б. П. Полозов, О. А. Федорович</i> .....  | 137 |
| <b>Кінетика фізико-хімічних процесів реформінгу вуглеводнів у плазмо-каталітичній системі</b>  |     |
| <i>Т. С. Донченко, О. М. Цимбалюк, В. Я. Черняк, Д. С. Левко</i> .....   | 138 |
| <b>Глобальні моди з <math>m = n</math> та їхня дестабілізація в прийдешніх експериментах з нейтральною інжекцією в стелараторі Wendelstein 7-X</b> |     |
| <i>Я. І. Колесниченко, А. Кьоніс, В. В. Луценко, М. Дрезлак, Ю. Туркін, П. Геландер</i> .....  | 139 |
| <b>Прояви геодезичної акустичної моди, збудованої енергійними іонами в токамаці</b>  |     |
| <i>Я. І. Колесниченко, Б. С. Лепяк, В. В. Луценко, Ю. В. Яковенко, Б. Грієрсон, В. В. Хейдбрінк, Р. Назікян</i> .....                              | 140 |
| <b>Спектроскопічні дослідження плазми електродугового розряду між композитними Cu-Cr електродами</b>   |     |
| <i>А. В. Лебідь, А. М. Веклич, О. В. Хоменко</i> .....   | 142 |
| <b>Плазмовий прискорювач із замкненим дрейфом електронів та газовими стінками</b>  |     |
| <i>І. В. Літовко, О. А. Гончаров, А. М. Добровольський, І. В. Найко, Л. В. Найко</i> .....   | 143 |
| <b>Вплив перехідних частинок на нестійкості плазми у квазі-ізодинамічному стелараторі</b>  |     |
| <i>В. С. Марченко, С. М. Резник</i> .....  | 144 |
| <b>Середня енергія електронів плазми у плазмово-рідинній системі для каталізу хімічних процесів</b>  |     |
| <i>О. А. Недибалюк, І. І. Федірчик, В. Я. Черняк</i> .....   | 145 |
| <b>Порівняльний аналіз процесів розсіяння і трансформації хвиль при параметричному збудженні дрейфових коливань</b>                                |     |
| <i>В. М. Павленко, В. Г. Панченко, М. А. Белошенко</i> .....   | 146 |
| <b>Вплив компонентного складу плазми імпульсних розрядів у воді на її електропровідність</b>   |     |
| <i>П. В. Порницький, П. Д. Старчик</i> .....   | 146 |
| <b>Дослідження електричних параметрів мікророзрядних систем та особливостей генерованої плазми</b>   |     |
| <i>Ок. В. Соломенко, Ол. В. Соломенко, В. Я. Черняк, В. В. Лендел, С. В. Мартиш, Д. О. Калустова, І. В. Присяжневич</i> .....                      | 148 |
| <b>Торцевий вращающийся скользящий разряд</b>  |     |
| <i>Е. В. Соломенко, В. В. Юхименко, В. Я. Черняк, Д. Л. Чернолуцький, В. В. Колган, А. Е. Лушкін, В. В. Шаповал, М. А. Якимов</i> .....            | 149 |
| <b>Вплив співвідношення окисник/вуглеводень на ефективність плазмово-каталітичного реформування вуглеводнів</b>                                    |     |
| <i>І. І. Федірчик, О. А. Недибалюк, В. Я. Черняк, Е. В. Мартиш, В. П. Демчина</i> .....  | 150 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Залежність часу життя електронів у щільній плазмі від її параметрів</b>  |     |
| <i>О. А. Федорович, Л. М. Войтенко</i> .....  | 152 |
| <b>Збудження коливань в рідкофазному акустичному циліндричному резонаторі мікросекундним електричним розрядом</b>       |     |
| <i>В. В. Юхименко, В. Я. Черняк, О. А. Федорович, М. Ю. Толстих, О. А. Недибалюк, Д. К. Гамазін, Є. В. Мартиш</i> ..... | 153 |
| <b>Створення джерела плазми на базі обертово-ковзного розряду для синтезу вуглецевих наноматеріалів</b>                 |     |
| <i>К. В. Юхименко, Ю. П. Веремій, В. Я. Черняк</i> .....  | 154 |
| <b>Кінетичні моделі втрат високоенергійних заряджених частинок із плазми токамака</b>                                   |     |
| <i>В. О. Яворський, В. Я. Голобородько, А. А. Гурин, К. Шопф</i> .....  | 155 |
| <b>Міра фазового об'єму гамільтонової системи, що переміщується множинними хвилями</b>                                  |     |
| <i>Ю. В. Яковенко, М. Г. Тищенко</i> .....  | 156 |

### *Секція 5. Радіобіологія та радіоекологія*

|   |     |
|---|-----|
| <b>Зниження дозового навантаження на пацієнтів при рентгенографічних дослідженнях</b>   |     |
| <i>Л. І. Асламова, Н. С. Мірошніченко, Н. В. Меленевська, Є. В. Куліч</i> ..  | 157 |
| <b>Дослідження цитогенетичних показників у лімфоцитах периферійної крові групи жителів м. жовті води та аналіз захворюваності населення міста</b>   |     |
| <i>Л. К. Бездробна, Л. В. Тарасенко, Т. В. Циганок, Т. В. Мельник, В. А. Курочкіна, Н. М. Тарасьєва, В. П. Главацька</i> .....  | 158 |
| <b>Математичне моделювання змін функціональних властивостей кісткового мозку мишей у процесі тривалого зовнішнього опромінення</b>  |     |
| <i>Р. В. Бойко, Д. І. Білько, І. З. Руссу, Н. М. Білько</i> .....   | 159 |
| <b>Термостатована камера для комбінованих радіобіологічних досліджень</b>   |     |
| <i>В. М. Венедиктов, Ю. С. Іванов, В. А. Лібман, Я. В. Пшеничний, Ю. Б. Шевченко</i> .....  | 160 |
| <b>Комбінована дія іонізуючого випромінювання та іонів важких металів на життєздатність культури клітин лінії L929</b>  |     |
| <i>Д. Д. Гапєєнко, Г. Й. Лавренчук</i> .....  | 162 |
| <b>Асоціація поліморфізму генів репарації ДНК XRCC1 та XPD та ризику виникнення раку щитоподібної залози в осіб, які зазнали дії іонізуючої радіації внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС</b> |     |
| <i>С. О. Генік-Березовська, В. М. Шкарупа, С. В. Клименко</i> .....   | 163 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Хемілюмінесценція крові шурів за моделювання аварійного надходження до організму <sup>131</sup>I</b>   |     |
| <i>Ю. П. Гриневич, А. І. Липська, І. П. Дрозд, С. В. Телецька</i> .....   | 165 |
| <b>Дослідження радіаційно-індукованого пошкодження хромосом в опромінених <i>in vitro</i> лімфоцитах периферичної крові підлітків</b>                       |     |
| <i>О. М. Демченко, О. О. Талан, О. В. Шеметун</i> .....   | 166 |
| <b>Динаміка накопичення <sup>131</sup>I та формування поглинених доз за змінного тривалого перорального надходження до організму шурів</b>                  |     |
| <i>І. П. Дрозд, А. І. Липська, О. А. Сова</i> .....   | 167 |
| <b>Оптимізація алгоритму розрахунку поглиненої дози за одноразового надходження до організму шурів <sup>131</sup>I</b>                                      |     |
| <i>І. П. Дрозд, А. І. Липська, В. І. Пастушенко, М. В. Найчук</i> .....   | 168 |
| <b>Особливості накопичення <sup>131</sup>I та дозоутворення у невагітних і вагітних самок шурів</b>   |     |
| <i>І. П. Дрозд, А. І. Липська, О. А. Сова</i> .....   | 170 |
| <b>Обґрунтування критичності мішеней серед генів цвітіння до радіаційного опромінення у рослин</b>  |     |
| <i>М. В. Кривохижа, Н. М. Рашидов</i> .....   | 171 |
| <b>Дослідження впливу атаксантина на радіаційно-індуковану хромосомну нестабільність у соматичних клітинах людини <i>in vitro</i></b>                       |     |
| <i>Д. А. Курінний, С. Р. Рушковський, О. Б. Дибська, М. А. Пілінська</i> ....   | 172 |
| <b>Модифікація накопичення кадмію проростками кукурудзи в умовах водної культури шляхом гострого гамма-опромінення насіння</b>                              |     |
| <i>Ю. О. Кутлахмедов, В. В. Швартау, Л. М. Михальська, А. Г. Салінов, С. А. Пчеловська, Л. В. Тонкаль</i> .....   | 174 |
| <b>Особливості комбінованого впливу нейтронів спектру поділу та світла червоного діапазону на клітини <i>in vitro</i></b>                                   |     |
| <i>Г. Й. Лавренчук, Ю. Б. Шевченко, Л. Є. Червонна, І. В. Козловська</i> ...  | 175 |
| <b>Особливості змін кровотворної системи шурів за одноразового введення <sup>131</sup>I</b>   |     |
| <i>А. І. Липська, Н. М. Рябченко, О. Б. Ганжа, О. А. Сова, І. П. Дрозд, Є. М. Прохорова</i> .....   | 177 |
| <b>Оцінка стану кровотворної системи мишоподібних гризунів з природних біотопів ближньої зони відчуження ЧАЕС</b>   |     |
| <i>А. І. Липська, Н. М. Рябченко, О. О. Бурдо, О. А. Сова, О. Б. Ганжа</i> .....  | 178 |
| <b>Радіопротекторні властивості 2-меркаптобензтіазолу у тест-системі перещеплених проліферуючих клітин</b>  |     |
| <i>Х. М. Литвинчук, Г. Й. Лавренчук, О. А. Бойко</i> .....  | 179 |
| <b>Зв'язок транскрипційної активності генів підтримки цілісності геному з морфо-фенологічними характеристиками опромінених рослин <i>A. thaliana</i> L.</b> |     |
| <i>С. В. Літвінов, Н. М. Рашидов</i> .....  | 180 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Вплив іонізуючого випромінювання та оксидів азоту на окисний метаболізм тканин організму з карциномою легені Льюїс</b>   |     |
| <i>Л. І. Маковецька, М. О. Дружчина, О. А. Главін, В. М. Михайленко</i> .....   | 182 |
| <b>Дослідження перспективних шляхів розвитку радіаційних технологій рибних харчових продуктів</b>   |     |
| <i>Є. Г. Міхнєва, Т. В. Ковалінська, В. І. Сахно</i> .....  | 183 |
| <b>Особливості перебігу сперматогенезу після локального гамма-опромінення тестикул лабораторних щурів</b>   |     |
| <i>О. А. Мотрина, О. В. Трофіменко, К. С. Андрейченко, О. С. Ватліцова, А. В. Клепко, С. В. Андрейченко</i> .....   | 184 |
| <b>Уровень проявления ростовых реакций и концентрации эндогенного пролина у проростков гороха в ответ на разные комбинации стрессоров</b>   |     |
| <i>О. Г. Нестеренко, Н. М. Рашидов, Д. М. Гродзинський</i> .....  | 185 |
| <b>Особливості функціонального стану гіпофізарно-тиреоїдної, гіпофізарно-гонадної систем ендокринної регуляції та вуглеводного обміну у білих лабораторних щурів першого покоління, народжених від тварин, які зазнали впливу інкорпорованого <sup>131</sup>I</b> |     |
| <i>Є. М. Прохорова, О. А. Бойко, О. Я. Плескач, І. Р. Дмитрієва, О. В. Копилова, Н. П. Атаманюк, І. П. Дрозд, А. І. Липська, В. В. Талько</i> .....   | 186 |
| <b>Цитогенетичний моніторинг хворих на місцевопоширений рак шийки матки в ході конформної променевої терапії в різних режимах фракціонування дози опромінення</b>   |     |
| <i>Н. М. Рябченко, В. С. Іванкова, Л. М. Барановська, Т. М. Нестеренко, А. І. Липська</i> .....   | 188 |
| <b>Особливості розвитку гормонального дисбалансу після локального опромінення тестикул щурів гамма-променями</b>  |     |
| <i>Л. В. Саковська, Л. В. Горбань, Ю. А. Кондратова, І. Т. Гавриш, А. В. Клепко, С. В. Андрейченко</i> .....  | 189 |
| <b>Цитогенетичні ефекти в кістковому мозку щурів при тривалому надходженні <sup>131</sup>I</b>  |     |
| <i>О. А. Сова, І. П. Дрозд</i> .....  | 190 |
| <b>Концептуальна модель інтегрованої системи управління якістю лабораторії ядерної криміналістики Центру екологічних проблем атомної енергетики Інституту ядерних досліджень НАН України</b>  |     |
| <i>В. В. Тришин, О. В. Божок, Г. Я. Мінчук</i> .....  | 191 |
| <b>Физиолого-биохимические свойства трех облученных поколений <i>Cladosporium cladosporioides</i> при действии низкоинтенсивного хронического облучения</b>   |     |
| <i>А. В. Тугай, Т. И. Тугай, В. А. Желтоножский, М. В. Желтоножская, Л. В. Садовников, А. А. Квашук</i> .....   | 192 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Decomposing radioactive hot particles found in the Chernobyl exclusion zone by microscopic fungi <i>Cladosporium cladosporioides</i></b><br><i>T. I. Tugay, V. A. Zheltonozhsky, M. V. Zheltonozhskaya, A. V. Tugay, L. V. Sadovnikov</i> ..... | 194 |
| <b>Детектування накопичення стронцію в трансгенних рослинах кукурудзи методом ICP-MS</b><br><i>В. В. Швартау, Л. М. Михальська, С. І. Михальська, О. М. Тищенко</i> ..   | 195 |
| <b>Аналіз іоному зразків ґрунтів України, відібраних до 1945 р.</b><br><i>В. В. Швартау, А. В. Кохан, Л. М. Михальська, Л. Д. Глущенко</i> .....   | 196 |
| <b>Неінвазивні методи визначення вмісту та локалізації нейтроно-захватних агентів <i>in vivo</i></b><br><i>Ю. Б. Шевченко, В. В. Тришин, Т. М. Малишева</i> .....  | 197 |
| <b>Аномалії паростків насіння очерету звичайного з водоєм Чорнобильської зони відчуження за умов додаткового іонізуювального опромінення</b><br><i>А. А. Явнюк, Н. Л. Шевцова, Д. І. Гудков</i> .....  | 198 |
| <b>Результати експериментальних лабораторних досліджень розповсюдження <sup>137</sup>Cs при згорянні зразків лісової біомаси</b><br><i>С. І. Азаров, В. Л. Сидоренко, Ю. П. Серєда</i> .....   | 200 |
| <b>Опыт обследования захоронений РАО Чернобыльской зоны отчуждения</b><br><i>М. Д. Бондарьков, В. Н. Глыгало, А. М. Максименко, Б. Я. Осколков, В. М. Антропов, В. П. Мельниченко, А. Г. Третьак</i> .....   | 201 |
| <b>Нові сорбенти на основі сполук титану для вилучення іонів стронцію з водних розчинів</b><br><i>Г. В. Васильєва, І. Ф. Миронюк, Л. І. Миронюк</i> .....  | 202 |
| <b>Модель міграції <sup>137</sup>Cs в системі «ґрунт – макроміцети» після аварії на АЕС</b><br><i>В. Д. Виноградська, Н. Є. Зарубіна, Б. С. Прістер</i> .....  | 203 |
| <b>Применение опыта организации радиэкологического мониторинга лесных экосистем на примере зоны аварии АЭС «Фукусима-1» (предлагаемый проект)</b><br><i>Д. А. Вишневский, Н. Е. Зарубина, О. Л. Зарубин</i> .....                                  | 204 |
| <b>Очищення водних розчинів від радіонуклідів природними та синтетичними сорбентами</b><br><i>С. І. Вучкан, В. І. Яковлев, Ю. М. Килівник, Г. В. Васильєва, М. Т. Саболчій, І. І. Гайсак</i> .....   | 205 |
| <b>Створення інформаційного порталу для регіональної мережі ядерно-криміналістичних лабораторій країн-учасниць ГУАМ</b><br><i>О. В. Гайдар, В. В. Тришин, Г. П. Гайдар</i> .....   | 206 |
| <b>Накопичення стабільних хімічних елементів і головних дозоутворювальних радіонуклідів водними рослинами Чорнобильської зони відчуження</b><br><i>Х. Д. Ганжа, Д. І. Гудков, Н. Л. Шевцова, Л. М. Михальська, В. В. Швартау</i> .....             | 208 |



|   |     |
|---|-----|
| <b>Рыбы Чернобыльской зоны отчуждения: современные уровни радионуклидного загрязнения, дозовые нагрузки, радиационные эффекты</b>   |     |
| <i>Д. И. Гудков, А. Е. Каглян, Н. А. Поморцева, А. Б. Назаров, В. В. Шукалевич, М. С. Баландина</i> .....                           | 209 |
| <b>Дистанционный контроль радиационной обстановки с применением малого беспилотного летательного аппарата</b>                       |     |
| <i>В. А. Канченко, И. С. Студзинская, Н. Л. Чепур, М. В. Желтоножская</i> .....   | 211 |
| <b><sup>137</sup>Cs у компонентах экосистемы водойми-охолоджувача ЧАЭС через 29 років після аварії</b>                              |     |
| <i>О. Л. Зарубін, Н. С. Зарубіна, В. А. Костюк, Е. Ю. Котішевська, І. А. Малюк</i> .....  | 212 |
| <b>Ремедіація ґрунтів лісових екосистем, що забруднені <sup>137</sup>Cs</b>   |     |
| <i>Н. С. Зарубіна, О. Л. Зарубін</i> .....  | 213 |
| <b>Результати спостережень за радіаційним станом водойми-охолоджувача ЧАЭС під час зниження рівня води</b>                          |     |
| <i>В. В. Канівець, Г. В. Лантев, С. М. Обрізан, Г. В. Лісовий, Г. А. Деркач</i> .....   | 214 |
| <b><sup>137</sup>Cs у донних відкладах Київського водосховища</b>   |     |
| <i>В. В. Канівець, Г. А. Деркач, Г. В. Лісовий, Б. С. Соколов</i> .....   | 215 |
| <b>Дистанційний пробовідбір радіоактивного аерозолі при аваріях на АЕС із використанням надлегкого безпілотної літака</b>           |     |
| <i>В. Я. Канченко, О. О. Ключников, М. Л. Чепур, М. В. Желтоножська</i> .....   | 217 |
| <b>Радіоекологічна характеристика території Біланівського родовища залізистих кварцитів</b>   |     |
| <i>К. О. Кориченський, Т. В. Лаврова, Г. В. Лантев, С. В. Тодосієнко</i> ....   | 218 |
| <b>Використання сучасних комунікаційних засобів та технологій для вдосконалення систем радіаційного моніторингу</b>                 |     |
| <i>В. І. Козій, О. В. Гайдар, В. В. Тришин</i> .....  | 219 |
| <b>Исследование концентрации гамма-радионуклидов в «горячих» частицах, отобранных в 2012 - 2015 гг. в 30-километровой зоне ЧАЭС</b> |     |
| <i>Н. В. Кулич, М. В. Желтоножская, В. И. Николаев, Л. В. Садовников</i> .....  | 220 |
| <b>Оцінка процесу осадокопичення у Дніпровському водосховищі за даними радіометричного датування</b>                                |     |
| <i>Т. В. Лаврова, Г. В. Лантев, О. В. Войцехович, В. В. Канівець, Г. А. Деркач, С. Б. Соколов</i> .....                             | 222 |
| <b>Дослідження впливу іонізуючого випромінювання за даними канцер-реєстрів</b>  |     |
| <i>І. М. Лютий</i> .....  | 223 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Комплексні радіоекологічні дослідження в природних екосистемах зони відчуження ЧАЕС</b>  |     |
| <i>В. І. Ніколаєв, В. А. Шитюк, А. І. Липська, Н. В. Куліч, О. О. Бурдо...</i>  | 224 |
| <b>Вимірювання <sup>90</sup>Sr у водних зразках бета-радіометром після іон-обмінного розділення та осаджування</b>                                    |     |
| <i>Л. С. Пірнач, Т. І. Дивак.....</i>   | 225 |
| <b>Особливості опромінення повітряно-водяних рослин на різних глибинах</b>  |     |
| <i>С. П. Пришляк, О. М. Волкова, В. В. Беляєв, О. О. Пархоменко.....</i>  | 226 |
| <b>Міграційні процеси та поширеність важких металів/радіонуклідів на заповідних територіях Закарпаття</b>   |     |
| <i>Н. Сватулюк, О. Симканич, В. Маслюк.....</i>   | 228 |
| <b>Особливості радіонуклідного забруднення вищих водяних рослин у зоні відчуження ЧАЕС</b>  |     |
| <i>З. О. Широка, Д. І. Гудков, В. Г. Кленус, О. Є. Каглян.....</i>  | 229 |
| <br><i>Додаток. Тези доповідей, що не увійшли до друкованого збірника</i>   |     |
| <b>Провідний ядерний центр України</b>  |     |
| <i>І. М. Вишневецький, Н. Л. Дорошко.....</i>   | Д1  |
| <b>Про можливість протонної надпровідності у одновимірних і двовимірних водних системах</b>   |     |
| <i>Л. С. Марценюк.....</i>  | Д1  |
| <b>Гальмівна здатність електронного газу в зовнішньому магнітному полі</b>  |     |
| <i>О. В. Хелемеля, Р. І. Холодов.....</i>   | Д2  |
| <b>Вміст хеомінів у сім'яній рідині залежно від отриманої дози опромінення</b>  |     |
| <i>А. В. Чернишов, Л. В. Стамболі, Б. В. Донської, С. М. Канюк, Л. В. Горбань.....</i>  | Д3  |
| <b>До питання оцінювання формування дози внутрішнього опромінення населення на віддаленому етапі подолання наслідків аварії на Чорнобильській АЕС</b> |     |
| <i>Г. М. Чоботько, В. П. Ландін, Л. А. Райчук, І. К. Швиденко, М. С. Уманський.....</i>   | Д4  |
| <b>Авторський показчик.....</b>   | 230 |

## **Тези доповідей з ядерної фізики**

### **ВИХРОВИЙ РУХ НУКЛОНІВ ПРИ ІЗОСКАЛЯРНИХ ДИПОЛЬНИХ ЗБУДЖЕННЯХ ВАЖКИХ ЯДЕР**

**В. І. Абросімов, О. І. Давидовська**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Ізоскалярний дипольний ядерний відгук виявляє не тільки дипольну моду стиснення (високоенергетичний резонанс), але й низькоенергетичний резонанс. Теоретичні дослідження показують, що низькоенергетична дипольна мода має суттєво вихровий характер (тороїдальна мода). Представляє інтерес подальше вивчення природи цієї колективної моди. Було використано трансляційно-інваріантну кінетичну модель малих коливань скінченної фермі-системи. Ця модель дає можливість знайти аналітичний вираз для динамічних флуктуацій функції розподілу в фазовому просторі при колективних дипольних збудженнях. За допомогою цього розв'язку отримано вираз для поля швидкостей, яке представляє собою локальну динамічну величину, що залежить від енергії збудження системи. Силова функція, отримана в рамках розглянутої кінетичної моделі, має дворезонансну структуру. Проведено чисельні розрахунки поля швидкостей для ізоскалярних дипольних резонансів у сферичних ядрах. Отримано, що поле швидкостей для високоенергетичного резонансу має компресійний характер, а для низькоенергетичного резонансу проявляє вихровий характер. Також знайдено, що характер поля швидкостей помітно змінюється в залежності від енергії збудження в межах піку низькоенергетичного резонансу. Це вказує на те, що тороїдальна мода може представляти собою тільки підструктуру низькоенергетичного резонансу. Відсутність низькоенергетичної ізоскалярної дипольної моди в моделі малих коливань рідкої краплі дає підставу припускати, що у формуванні низькоенергетичної моди важливу роль відіграє динамічна деформація фермі-поверхні.

### **ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ХВИЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ ДЕЙТРОНА В ІМПУЛЬСНОМУ ПРЕДСТАВЛЕННІ**

**І. І. Гайсак, В. І. Жабя**

*Ужгородський національний університет, Ужгород*

Різні реалістичні варіанти потенціалів нуклон-нуклонної взаємодії, такі як Боннський, Московський, потенціали Неймегенської групи (NijmI, NijmII, Nijm93), Argonne v18 чи Парижський потенціал мають досить непросту структуру і громіздкий запис. Наприклад, оригінальний потенціал Рейда Reid68 був параметризований на основі фазового аналізу неймегенською групою і

отримав назву Reid93. Параметризація була проведена для 50 параметрів потенціалу, причому  $\chi^2/N_{data} = 1,03$  [1].

Але не зважаючи на добре узгодження теоретичних розрахунків параметрів дейтрона з експериментальними даними при застосуванні цих потенціалів, при прискіпливому аналізі хвильових функцій дейтрона виявляються зайві вузли або в конфігураційному або/та в імпульсному просторах. Наявність таких вузлів вказує на існування неузгодженостей в застосованих чисельних методах. Для потенціалів Reid93 і Argonne v18 у роботі [2] розраховано хвильову функцію дейтрона у координатному та імпульсному представленнях, які не містять надлишкових вузлів.

У багатьох випадках при теоретичних розрахунках зручно користуватися аналітичними параметризаціями хвильової функції дейтрона. Починаючи з роботи [3] широко використовується базиси експоненціальних функцій для хвильової функції в конфігураційному просторі та раціональних функцій для хвильової функції в імпульсному просторі

$$\sum_{j=1}^N C_j \exp(-m_j r), \quad \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{j=1}^N \frac{C_j}{m_j^2 + p^2}.$$

У роботі [4] наведено параметризації хвильових функцій дейтрона в імпульсному просторі для багатьох потенціалів нуклон-нуклонної взаємодії. В якості базиса взято функції Гауса.

$$\sum_{j=1}^N A_j \exp(-m_j p^2).$$

У нашій роботі проведено параметризації хвильової функції дейтрона в імпульсному представленні для потенціалу Reid93 в базисах осциляторних та раціональних функцій.

1. *Stoks V.G.J., Klomp R.A.M., Terheggen C.P.F. et al.* // Phys. Rev. C. - 1994. - Vol. 49. - P. 2950 - 2962.
2. *Гайсак І.І., Жабя В.І.* // Наук. вісн. Ужгородського університету. Серія Фізика. - 2014. - № 36. - С. 100 - 106.
3. *Lacombe M., Loiseau B., Vinh Mau R.* // Phys. Lett. -1980. - Vol. 101B. - P. 139 - 140.
4. *Ierusalimov A.P., Lykasov G.I., Viviani M.* // arXiv:1002.0249v1 [nucl-th]

# ОБЧИСЛЕННЯ СЕРЕДНІХ КУТОВИХ МОМЕНТІВ ТА ЇХНІХ СИСТЕМАТИК У ПЕРВИННИХ ФРАГМЕНТАХ ПОДІЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ ІЗОМЕРНИХ ВІДНОШЕНЬ

**О. М. Горбаченко<sup>1</sup>, О. М. Ткач<sup>1</sup>, В. А. Плюйко<sup>1,2</sup>, О. І. Давидовська<sup>2</sup>,  
К. М. Солодовник<sup>1</sup>, Б. М. Бондар<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

<sup>3</sup> Всеукраїнський центр радіохірургії Клінічної лікарні «Феофанія», Київ

У роботі аналізується та тестується, запропонована у [1, 2], узагальнена модель Хьюзенги - Ванденбоша для обчислення середніх кутових моментів  $\bar{J} = \sum_J JP(J) / \sum_J P(J)$  первинних фрагментів поділу з використанням ізомерних відношень  $R = \sigma_m / \sigma_g$ , де  $\sigma_m(\sigma_g)$  - переріз утворення фрагменту в ізомерному (основному) стані,  $P(J)$  - густина розподілу кутових моментів. Аналіз виконано для первинних фрагментів  $^{84}\text{Br}$ ,  $^{90}\text{Rb}$ ,  $^{131,133}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{Sb}$ ,  $^{132,134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  поділу ядер  $^{235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  під дією гальмівного випромінювання з різними граничними енергіями [1-6] та для всіх наявних даних для цих фрагментів під дією нейтронів [7].

Проаналізовано залежності середніх кутових моментів  $\bar{J}$  від виразів для густин ядерних рівнів, радіаційних силових функцій та нейтрон-протонного надлишку. При розрахунках  $\bar{J}$  враховано вплив на ізомерне відношення вильоту нейтронів з початкових фрагментів поділу ядер з використанням кодів EMPIRE 3.2[8] та TALYS 1.4[9]. Обчислені значення  $\bar{J}$  та їхні похибки  $\Delta\bar{J}$  для різних фрагментів поділу та розподілів  $P(J)$ . Результати обчислень, які отримані за допомогою розробленого методу, узгоджуються з раніше отриманими іншими авторами. Запропоновано та проаналізовано низку систематик для опису  $\bar{J}$  в залежності від характеристик материнського ядра та первинного фрагменту. Продемонстровано, що найкраще описує значення  $\bar{J}$  для фотоподілу та поділу під дією нейтронів систематика вигляду:  $\bar{J} = a_1 A^{a_2} (1 + a_3 (N - Z)^2) + a_4 Z_F^2 / A_F$ , де  $a_i$  – сталі, а  $A$  ( $A_F$ ) і  $Z$  ( $Z_F$ ) – масове число та заряд ядра фрагменту (материнського ядра).

1. Vyshnevskiy I.M., Zheltonozhskii V.O. et al. // Ядерна фізика та енергетика. - 2014. - Т. 15. - С. 111.
2. Vyshnevskiy I.M., Zheltonozhskii V.O. et al. // Ядерна фізика та енергетика. - 2015. - Т. 16. - С. 5.
3. Thierens H., Proot B. et al. // Phys. Rev. C. - 1982. - Vol. 25, No. 3. - P. 1546.
4. De Frenne D., Proot B. et al. // Phys. Rev. C. - 1984. - Vol. 29, No. 5. - P. 1777.

5. *Vishnevskii I.N., Davidovskaya O.I. et al. // Izvestiya RAN. - 2010. - Vol. 74. - P. 538.*
6. *Vishnevskii I.N., Zheltonozhskii V.A. et al. // Abstract of ISINN22, Dubna, 2014. - P. 85.*
7. *Naik, H., Dange, S.P. et al. // Nucl. Phys. A. - 1995. - Vol. 587. - P. 273.*
8. *Herman M., Capote R. et al. // Nuclear Data Sheets. - 2007. - Vol. 108. - P. 2655; <http://www.nndc.bnl.gov/empire/>.*
9. *Koning A.J., Hilaire S., Duijvestijn M.C. // Proc. of the Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology (Nice, France, 22 - 27 May, 2007). - P. 211. - <http://www.talys.eu/>.*

## **SURFACE CORRECTIONS TO THE SEMCLASSICAL SHELL-STRUCTURE MOMENT OF INERTIA**

**D. V. Gorpichenko<sup>1</sup>, A. G. Magner<sup>1</sup>, J. Bartel<sup>2</sup>, J. P. Blocki<sup>3</sup>**

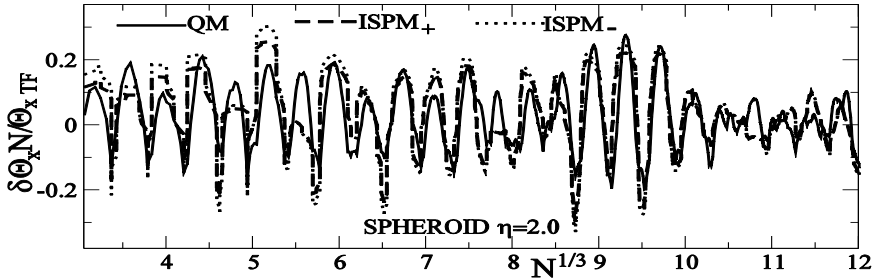
<sup>1</sup> *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

<sup>2</sup> *Strasbourg University, Strasbourg, France*

<sup>3</sup> *National Centre for Nuclear Research, Warsaw, Poland*

The moment of inertia for nuclear collective rotations was derived within the periodic-orbit theory (POT) based on the cranking model and the Strutinsky shell-correction method, taking into account surface corrections in the effective-surface (ES) approximation. This moment of inertia (MI) for adiabatic (statistical-equilibrium) rotations can be approximated by a generalized rigid-body MI accounting for shell corrections of the particle density and its spacial gradients. It is shown that MI shell components  $\delta\Theta$  can be expressed in terms of the free-energy shell corrections  $\delta\Theta \propto \delta F$  through the semiclassical phase-space trace formula, where the proportionality factor depends on the nuclear surface corrections. This factor is found to be  $\langle l_x^2 / 2m\varepsilon^2 \rangle$ , where  $m$  and  $\varepsilon$  are the particle mass and energy, and  $l_x$  is the angular-momentum projection onto the  $x$  axis (perpendicular to the symmetry  $z$  axis). The expectation value is calculated with the distribution function density  $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, \varepsilon)$  as the derivative of the distribution function in the phase space variables  $\mathbf{r}, \mathbf{p}$  with respect to the energy  $\varepsilon$ . A semiclassical approximation of  $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, \varepsilon)$  is obtained in the extended Thomas-Fermi (ETF) approach,  $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, \varepsilon) = f_{TF} + f_s(\mathbf{r}, \mathbf{p}, \varepsilon) = \delta(\varepsilon - H(\mathbf{r}, \mathbf{p})) + O(\hbar^2)$  using the Wigner-Kirkwood expansion in  $\hbar$ , where the surface corrections  $f_s(\mathbf{r}, \mathbf{p}, \varepsilon)$  of order  $O(\hbar^2)$  can be expressed in terms of gradients of the TF particle density for a given Hamiltonian function  $H(\mathbf{r}, \mathbf{p})$ . Integrals over are obtained in terms of the surface energy

constant  $b_s \approx 20$  MeV in the ES approximation. Taking the ETF ES corrections in  $\langle l_x^2 / 2m\epsilon^2 \rangle$  into account, one obtains the MI POT shell components.



MI quantum (QM) and semiclassical improved-stationary-phase method (ISPM) shell corrections  $\delta\Theta_x$  in units of TF values  $\Theta_{xTF}$  as functions of the particle number,  $N^{1/3}$ , for spheroidal cavity with the ratio of semiaxes  $\eta = b/a = 2.0$ ,  $a^2b = const$ , with (ISPM<sub>+</sub>) and without (ISPM<sub>-</sub>) surface corrections.

Figure shows nice agreement between the quantum and semiclassical results improved at smaller particle numbers by accounting for surface corrections and bifurcations for a large deformation.

1. Gorpichenko D.V., Magner A.G., Bartel J., Blocki J.P. - Phys. Scr. T. - 2015. - Vol. 90. - P. 114008.

## ОПИС КОРЕЛЯЦІЙ ТОТОЖНИХ НУКЛОНІВ В АДАБАТИЧНІЙ ТРИЧАСТИНКОВІЙ МОДЕЛІ

**В. В. Гриньов, Б. Ю. Даниловська, Р. М. Плекан, В. Ю. Пойда**

*Ужгородський національний університет, Ужгород*

Труднощі математичного характеру, які виникають при розв'язку рівняння Шредінгера для стаціонарних станів атомних ядер, змушують до пошуку наближених методів і модельних підходів його розв'язання. Найбільш відомим з них є метод Хартрі-Фока [1], який істотно спрощує розв'язок багатонуклонної задачі і зводить її в кінцевому рахунку до розв'язку одонуклонної задачі.

Однак, врахування кутових і радіальних кореляцій нуклонів і відповідно до ефектів спарювання нуклонів одного сорту, які проявляються, зокрема, у наявності щілини у енергетичних спектрах збуджених станів парно-парних ядер та її відсутності у спектрах непарних і непарно-непарних ядер, призводить до гострої необхідності мати методи розрахунку хвильових функцій та

енергетичного спектру стаціонарних станів парно-парних ядер, які виходять за рамки одноступінчастих наближень. Іншими словами, виникає необхідність у теоретичному описі зв'язаних станів пари тотожних нуклонів.

Як відомо, найбільш послідовно парні кореляції тотожних нуклонів враховуються в надплинній моделі ядра [2, 3] на основі формалізму вторинного квантування. У даній роботі пропонується парні кореляції між нуклонами враховувати в потенціальному підході в рамках адіабатичної тричастинкової моделі [4], в якій парно-парне ядро розглядається як система, що складається із відповідного остова і двох валентних нуклонів, які рухаються в його статичному полі. В основі моделі лежить припущення про розділення руху валентних нуклонів у просторі  $R^6$  на швидкий рух по кутових змінних і адіабатичний (повільний) вздовж гіперрадіусу  $R$  та введення зручного для опису поняття потенціального терму нуклонів ядра  $U_n(R)$ . Зауважимо, що запропонована модель базується на припущенні про існування середнього ядерного поля, але в ній враховується також короткодійна залишкова взаємодія валентних нуклонів. Ефективне середнє поле остова моделюється потенціалом Вудса-Саксона з одночастинковою спін-орбітальною взаємодією. Кореляції між валентними нуклонами враховуються, відповідно, введенням між ними залишкової взаємодії, яка моделюється потенціалом з нульовим радіусом дії із врахуванням відштовхування нуклонів на малих відстанях.

Ефективність моделі ілюструється на прикладі чисельних розрахунків енергетичних спектрів для цілого ряду парно-парних ядер. Результати розрахунків енергетичного спектру низьколежачих збуджених станів парно-парних ядер узгоджуються з існуючими експериментальними даними для області легких ядер, в області середніх і важких ядер необхідно враховувати ефекти поляризації парно-парного остова, а також проводити змішування конфігурацій у незаповненій оболонці із-за кореляцій тотожних нуклонів. Досліджуються також внески у відповідні спектри енергій спарювання, обумовлених залишковою взаємодією тотожних валентних нуклонів, та аналізуються основні механізми формування збуджених станів парно-парних ядер. Результати розрахунків підтверджують експериментальні дані про енергії спарювання за рахунок кореляцій нуклонів, зокрема той факт, що вклад спарювання в енергетичний спектр ядер, як правило, не перевищує 2 МеВ. Доводиться, що за рахунок залишкової взаємодії тотожних валентних нуклонів виникає тонка структура енергетичного спектру по сумарному кутовому моменту ядра.

1. Барц Б.И. и др. Метод Хартри-Фока в теории ядра. - К.: Наук. думка, 1982.
2. Soloviev V.G. // Nucl. Phys. - 1958/59. - Vol. 9. - P. 655.
3. Belyaev S.T. // Dan. Mat. Fys. Medd. - 1959. - Vol. 3. - P. 1.
4. Плекан Р.М., Пойда В.Ю., Хіміч І.В. // УФЖ. - 2004. - Т. 49. - С. 743.

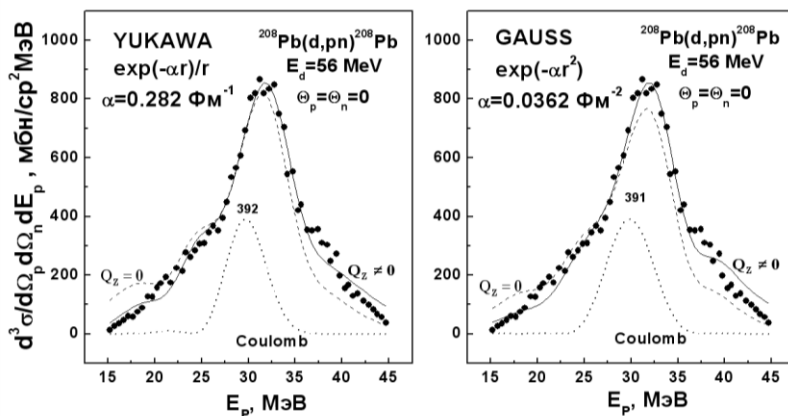


# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПРОТОНОВ В ДИФРАКЦИОННОМ РАЗВАЛЕ ДЕЙТРОНОВ ЯДРАМИ $^{208}\text{Pb}$ ПРИ ЭНЕРГИИ 56 МЭВ

**В. В. Давидовский, А. Д. Фурса**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

В дифракционном приближении, обобщенном на случай неупругих процессов [1], теоретически исследована реакция (d, pn) развала дейтрона с энергией 56 МэВ при его столкновении с ядрами  $^{208}\text{Pb}$  и вылете продуктов реакции под нулевыми углами. Учитывались как кулоновское, так и ядерное взаимодействие дейтрона с ядром. Волновые функции дейтрона в начальном и в конечном состоянии строились ортогональными друг к другу, чтобы качественно учесть взаимодействие в конечном состоянии пр пары и избежать ложных вкладов в сечение реакции при близких к нулю передаваемых импульсах. Для основного состояния дейтрона в расчетах использовались юкавская, экспоненциальная и гауссовская формы волновой функции. Рассчитаны энергетические спектры образующихся протонов с точностью вплоть до второго порядка по отношению  $R_d/R_{\text{Pb}}$ , что обеспечивает хорошую точность расчетов. Приближение нулевого радиуса для дейтрона оказывается здесь недостаточным.



Произведено сравнение рассчитанных спектров с данными при 56 МэВ [2] на  $^{208}\text{Pb}$  (рисунок). Показано, что в рассматриваемой реакции вклад ядерно-кулоновской амплитуды развала превышает величину вклада чисто кулоновской амплитуды, которая доминировала в случае реакции на  $^{12}\text{C}$  и  $^{40}\text{Ca}$ . Это приводит к тому, что кардинально меняется форма энергетического спектра протонов, а именно вместо двугорбой структуры спектр приобретает куполообразную форму, которая свойственна ядерно-кулоновской амплитуде. Наи-

лучшее описание экспериментального спектра протонов достигается при использовании юкавской формы волновой функции дейтрона.

1. Davydovskiy V.V., Foursat A.D. // Proc. of the 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv 2012). - 2012. - P. 136 - 140.
2. Okamura H., Hatori S., Matsuoka N. et al. Strong evidence of the Coulomb breakup of the deuteron at 56 MeV // Physics Letters B. - 1994. - Vol. 325. - P. 308 - 312.

## РОЗПОДІЛ УЛАМКІВ ПОДІЛУ ВИСОКОЗБУДЖЕНИХ ЯДЕР ПО КІНЕТИЧНІЙ ЕНЕРГІЇ ТА МАСІ

**В. Ю. Денисов, Т. О. Маргітич**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Досліджено енергію взаємодії двох ядер з урахуванням лінійних членів пов'язаних з квадрупольною, октупольною, гексадекапольною деформаціями поверхонь ядер та квадратичними членами за параметром квадрупольної деформації. При визначенні повної енергії взаємодії ядер враховувалися кулонівська, ядерна енергії та енергія деформації поверхні кожного ядра. Показано, що бар'єр та енергія взаємодії двох ядер, залежать від їхньої деформації та визначено значення цих деформацій для мінімального бар'єру. Різниця між мінімальним бар'єром для сферичних ядер та бар'єром з мінімальним значенням потенціалу для деформованих ядер, з урахуванням вище зазначених деформацій, зростає зі збільшенням маси та заряду взаємодіючих ядер. Найбільший вплив на висоту бар'єру має квадрупольна деформація, врахування октупольної деформації незначною мірою зменшує бар'єр, а гексадекапольна деформація має найменший вплив на значення висоти бар'єру.

За допомогою обчислених значень мінімального бар'єру, енергії збудження компаунд-ядра та емпіричних енергій зв'язку ядер знайдено густину рівнів для різних комбінацій ядер, які можливі при поділі високозбудженого ядра. Густина рівнів уламків поділу пов'язана з імовірністю виходу відповідної комбінації ядер при поділі ядра. В даній моделі добре описано розподіл уламків поділу по масі ядер, які сформовані при захопленні 140 MeV альфа-частинок ядрами  $^{165}\text{Ho}$  та  $^{197}\text{Au}$ . Розподіл уламків поділу по масі ядер описано без введення додаткових параметрів.

Для опису розподілу уламків поділу по енергії необхідно врахувати, що уламки взаємодіють між собою і мають суттєво деформовану форму в точці бар'єру. Деформована форма уламків релаксує до сферичної в часі. Також в системі уламків існує тертя, яке пов'язане з ядерною взаємодією уламків і нуклонів в них, та додатковим збудженням нуклонів. Врахування тертя та затухання деформації ядер, а також ядерної та кулонівської взаємодій дало

змгу гарно описати експериментальний енергетичний розподіл уламків поділу, сформованих при захопленні 140 MeV альфа-частинок ядрами  $^{165}\text{Ho}$  та  $^{197}\text{Au}$ .

## КОМБІНОВАНІ АТОМНО-ЯДЕРНІ РОЗПАДИ

**О. Я. Дзюблик**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Розглянуто декілька ефектів, які виникають при взаємодії атомних електронів та ядер, як єдиної системи, з електромагнітним полем. Так, розвинута послідовна теорія комбінованого розпаду збудженого  $3/2^+$  стану ядра  $^{153}\text{Eu}$  з енергією 103 keV та К-дірки в атомній оболонці, що утворилися при  $\beta^+$ -розпаді  $^{153}\text{Gd}$  [1]. Вважається, що розпад такого початкового стану системи відбувається в два етапи. Спочатку відбувається перехід ядра в основний  $5/2^+$  стан з передачею енергії через віртуальний фотон 2р-електрону, який вилітає в неперервний спектр. Потім цей конверсійний електрон повертається в атом на все ще вільну К-вакансію, випромінюючи при цьому  $\gamma$ -квант з енергією 144 keV, що складається з енергій ядерного переходу та атомного  $2p \rightarrow 1s$  переходу. Виведена аналітична формула для імовірності  $P$  такого комбінованого розпаду із злиттям енергій ядра та атома. Оцінки показують, що  $P = 2 \cdot 10^{-13}$ , що значно менше попередніх теоретичних оцінок ( $P \sim 10^{-9}$  [2]) та експериментального числа ( $P \sim 10^{-7}$  [3]). Справа в тому, що імовірність комбінованого розпаду  $P \sim \Gamma\gamma/\Gamma\text{К}$ , де  $\Gamma\gamma$  і  $\Gamma\text{К}$  – радіаційна ширина  $3/2^+$  рівня  $^{153}\text{Eu}$  та ширина К-дірки, відповідно. Вже саме відношення  $\Gamma\gamma/\Gamma\text{К} \sim 10^{-9}$ . Крім того, цей фактор ще треба помножити на імовірність повернення конверсійного електрона в атом, яка теж значно менша одиниці.

Жваву дискусію свого часу визвали експерименти Колінза та інших по гамма-стимульованому розпаду  $16^+$  К-ізомеру  $^{178}\text{Hf}m^2$  з енергією 2,45 MeV та періодом напіврозпаду 31 рік. Вони спостерігали 2 % прискорення розпаду  $^{178}\text{Hf}m^2$ . Нещодавні експерименти Киришука та інших [4] знов підтвердили ці висновки. В [5] таке прискорення пояснювалось за допомогою NEET [6]. А саме, падаючий рентгенівський фотон іонізує L3-оболонку атома. Потім M5 електрон переходить на вільний 3р-рівень, передаючи енергію ядру  $^{178}\text{Hf}m^2$ . При цьому ізомер переходить в збуджений проміжний стан, який за припущенням має сильну неаксіальність ( $\gamma \sim \pi/6$ ). В цьому стані існує суттєва розмазка хвильової функції по К, яка і дає змогу подальші розпади в нижні стани.

Крім того, розвинута була і альтернативна модель. Припускалось, що проміжний стан  $^{178}\text{Hf}$  дуже м'який по відношенню до  $\gamma$ -руху. Внаслідок цього відбувається тунелювання ядра між потенційними ямами з  $\gamma \sim 0$  та  $\gamma \sim \pm\pi/3$ . В ямах, де  $\gamma \sim \pm\pi/3$ , проекція спіну ядра є  $K' = 16$  на вісь квантування  $\zeta'$ , перпендикулярну початковій осі симетрії  $\zeta$  з  $\gamma \sim 0$ . Тобто спін ядра в ямах  $\gamma \sim \pm\pi/3$  розмазано по К відносно осі  $\zeta$ , що знімає заборону по К для  $\gamma$ -переходів в нижні стани ядра.

1. *Dzyublik A.Ya.* // Phys. Atom. Nucl. - 2016. -Vol. 79, No. 3.
2. *Давыдов А.В. и др.* // Изв. АН СССР. - 1985. - Т. 49. - С. 2090.
3. *Вишневський І.М. та ін.* // Тези доповідей ХХІІ щорічн. конф. ІЯД НАН України. - К.: Ін-т ядерних досл., 2015. - С. 28.
4. *Kirischuk V.I. et al.* // Phys. Lett. B. - 2016. - Vol. 750. - P. 89.
5. *Dzyublik A.Ya.* // Nucl. Phys. At. Energy. - 2011. - Vo. 14. - P. 13.
6. *A.Ya.Dzyublik*, Письма ЖЭТФ 93, 393 (2011); Phys. Rev. C 90, 054619 (2013).

## АПРОКСИМАЦІЯ ХВИЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ В КООРДИНАТНОМУ ПРЕДСТАВЛЕННІ І РАДІАЛЬНІ МОМЕНТИ ДЕЙТРОНА

**В. І. Жаба**

*Ужгородський національний університет, Ужгород*

Відомі чисельні значення радіальної хвильової функції дейтрона в координатному представленні можна апроксимувати за допомогою аналітичної форми [1]:

$$R_l(r) = r^l \sum_{i=1}^N A_i \exp(-a_i r^2). \quad (1)$$

У роботі [1] значення  $N = 13$  для аналітичних форм (1), а величина  $\chi^2 = 10^{-4}$ . Також можна провести апроксимацію хвильової функції дейтрона і по аналітичній формі виду

$$R_l(r) = r \sum_{i=1}^N A_i \exp(-a_i r^2). \quad (2)$$

Незважаючи на громіздкі і довготривалі розрахунки і мінімізації  $\chi^2$  (до величини менших за  $10^{-8}$ ), доводилося апроксимувати чисельні значення хвильових функцій дейтрона для потенціалів Неймегенської групи (NijmI, NijmII, Nijm93 і Reid93) і для потенціалу Argonne v18, масиви чисел яких становили по 839x4 значень в інтервалі  $r = 0-25$  фм і 1500x4 значень в інтервалі  $r = 0 - 15$  фм відповідно. Проаналізувавши величини  $\chi^2$  у залежності від вибору аналітичної форми і числа доданків розкладу  $N$ , виявилось, що кращою є саме аналітична форма (2): для  $u(r)$  мінімальне значення  $\chi^2$  становлять  $10^{-8} - 10^{-9}$ , для  $w(r) - 10^{-10}$ . Отримані для (1) значення  $\chi^2$  на порядок більші. Слід зауважити, що значення  $N$  відрізняється.

По чисельно отриманих хвильових функціях (2) розраховано радіальні моменти [2]:

$$\langle r^n \rangle_u = \int_0^\infty r^n u^2(r) dr, \quad \langle r^n \rangle_w = \int_0^\infty r^n w^2(r) dr, \quad \langle r^n \rangle_{uw} = \int_0^\infty r^n u(r) w(r) dr. \quad (3)$$

Наведені у таблиці значення  $\langle r^n \rangle$  збігаються із даними [2] для кіральних потенціалів.

### Радіальні моменти дейтрона ( $n = 0; 1; 2$ )

|                            | NijmI    | NijmII   | Nijm93   | Reid93   | Av18     |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\langle r^2 \rangle_u$    | 15,1163  | 15,1388  | 15,1124  | 15,1564  | 14,9854  |
| $\langle r^2 \rangle_w$    | 0,34814  | 0,34376  | 0,34501  | 0,34286  | 0,34268  |
| $\langle r^2 \rangle_{uw}$ | 2,04547  | 2,03586  | 2,03571  | 2,03271  | 2,02198  |
| $\langle r^1 \rangle_u$    | 3,13214  | 3,13887  | 3,13061  | 3,13968  | 3,12867  |
| $\langle r^1 \rangle_w$    | 0,12174  | 0,12039  | 0,12147  | 0,12060  | 0,12132  |
| $\langle r^1 \rangle_{uw}$ | 0,56172  | 0,55944  | 0,56009  | 0,55906  | 0,55898  |
| $\langle r^0 \rangle_u$    | 0,94334  | 0,94369  | 0,94268  | 0,94302  | 0,94201  |
| $\langle r^0 \rangle_w$    | 0,05664  | 0,05635  | 0,05754  | 0,05698  | 0,05759  |
| $\langle r^0 \rangle_{uw}$ | 0,21711  | 0,21657  | 0,21821  | 0,21716  | 0,21789  |
| $r_m, \text{фМ}$           | 1,96625  | 1,9674   | 1,96579  | 1,96845  | 1,95756  |
| $Q_d, \text{фМ}^2$         | 0,271866 | 0,270726 | 0,270642 | 0,270325 | 0,268817 |

Радіальні моменти дейтрона  $\langle r^2 \rangle$  вносять вклад у радіус  $r_d$  і квадрупольний момент  $Q_d$ :

$$r_d = \frac{1}{2} \{ \langle r^2 \rangle_u + \langle r^2 \rangle_w \}^{1/2}, \quad Q_d = \frac{\sqrt{8}}{20} \langle r^2 \rangle_{uw} - \frac{1}{20} \langle r^2 \rangle_w. \quad (4)$$

По хвильових функціях (2) розрахована дейтронна тензорна поляризація  $t_{20}$  добре узгоджується з експериментальними і теоретичними даними в інтервалі імпульсів 1 - 4 фМ<sup>-1</sup>.

1. Dubovichenko S.B. // Phys. Atom. Nucl. - 2000. - Vol. 63, No. 5. - P. 734 - 738.
2. Arriola E.R., Valderrama M.P. // Eur. Phys. J. A. - 2007. - Vol. 31, Iss. 4. - P. 549-552.

## РОЗПОДІЛИ УЛАМКІВ ПОДІЛУ АКТИНІДНИХ ЯДЕР ЗА МАСОЮ ТА ЕНЕРГІЄЮ

**Ф. О. Іванюк**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Форма поверхні ядра є однією з основних понять в теоретичній ядерній фізиці. Як правило, форму поверхні параметризують за допомогою деякого набору параметрів деформації. В роботах [1, 2] було запропоновано визначати форму, яку ядро приймає в процесі поділу, мінімізуючи енергію ядра в моделі рідкої краплі при додаткових обмеженнях, які фіксують об'єм та ви-

довження ядра. Цей метод не використовує жодну параметризацію форми та визначає форми з найменшою енергією. Недавно метод було розвинуто [3, 4] шляхом врахування масової асиметрії, впливу обертання та оболонкової структури на форму ядра.

Важливою особливістю даного методу є можливість формального визначення точки розриву ядер на два фрагменти. Метод також дає змогу розрахувати оптимальну форму двох розділених фрагментів. Маючи в своєму розпорядженні форму та енергію ядра безпосередньо перед точкою розриву та зразу після розриву, можна оцінити величини, які спостерігаються в експериментах з фізики поділу атомних ядер: масові розподіли уламків поділу, повну кінетичну енергію та енергію збудження уламків поділу, множинність нейтронів, які вилітають з уламків поділу.

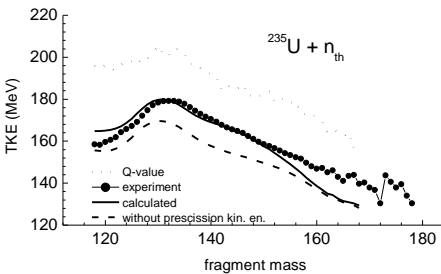


Рис. 1. Залежність повної кінетичної енергії уламків поділу ядер  $^{235}\text{U}$  тепловими нейтронами від маси уламку.

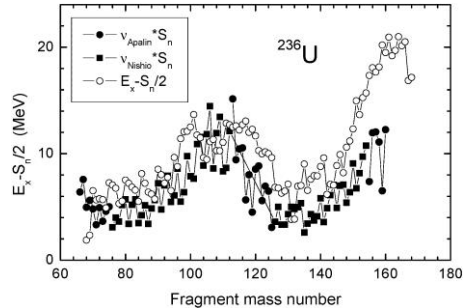


Рис. 2. Розраховані (відкриті кружки) значення енергії збудження уламків поділу та експериментальні значення (заповнені кружки) множинності нейтронів, помножені на енергію відділення нейтронів.

Розраховані в [5, 6] розподіли уламків поділу ядер  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  та  $^{245}\text{Cm}$  тепловими нейтронами за масою, кінетичною енергією, енергією збудження досить добре узгоджуються з експериментальними даними. Пиловидна залежність множинності нейтронів від маси уламку також якісно відтворена розрахунками (рис. 1 та 2).

1. *Strutinsky V.M., Lyashchenko N.Ya., Popov N.A.* // Nucl. Phys. - 1963. - Vol. 46. - P. 659.
2. *Ivanyuk F.A.* // Physica Scripta. - 2014. - Vol. 89. - P. 0540012.
3. *Ivanyuk F.A.* // Int. J. Mod. Phys. - 2009. - Vol. E18. - P. 130.
4. *Ivanyuk F.A., Pomorski K.* // Phys. Rev. - 2009. - Vol. C79. - P. 054327.
5. *Ivanyuk F.A.* // Physics Procedia. - 2013. - Vol. 47. - P. 17.
6. *Ivanyuk F.A., Chiba S., Aritomo Y.* // Phys. Rev. - 2014. - Vol. C 90. - P. 054607.

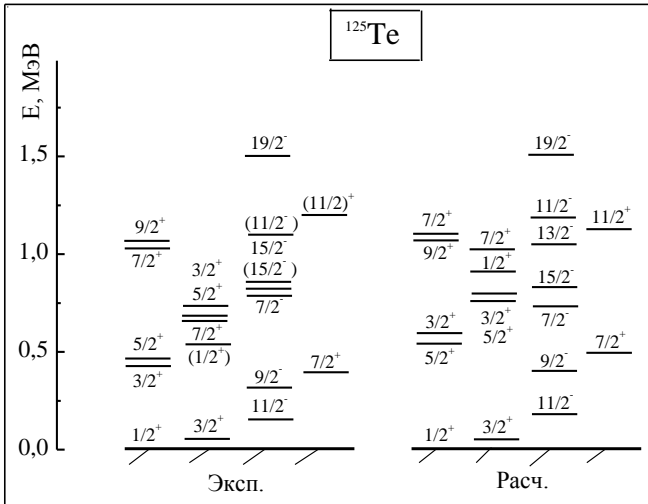
# БЕТА-РАСПАД $^{125}\text{I} \rightarrow ^{125}\text{Te}$

**А. А. Куртева**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

В рамках динамической коллективной модели описан электронный захват  $^{125}\text{I} \rightarrow ^{125}\text{Te}$ . В использованном методе [1] учитываются квазичастичные и многофононные (до десяти фононов) состояния основной полосы четно-четного остова, а также влияние вакуумных флуктуаций квазичастиц на перенормировку одночастичных моментов и эффективных сил. Рассчитаны энергии, магнитные дипольные и электрические квадрупольные моменты, спектроскопические факторы основного и возбужденных состояний  $^{125}\text{Te}$ , а также приведенные вероятности электромагнитных переходов между ними.

На рисунке представлена часть схемы уровней  $^{125}\text{Te}$ .



Распад идет с основного состояния  $^{125}\text{I}$ , главный вклад в которое дает одночастичное состояние  $d_{5/2}$ , есть примесь состояний  $s_{1/2}$ ,  $g_{7/2}$ ,  $d_{3/2}$ . Энергия распада мала  $Q = 186$  кэВ. С интенсивностью 100% переход идет на  $3/2_1^+$ -состояние  $^{125}\text{Te}$ , главный вклад в которое дает одночастичное состояние  $d_{3/2}$ , есть примесь состояний  $s_{1/2}$ ,  $g_{7/2}$ ,  $d_{3/2}$ . Экспериментальное значение  $\lg ft = 5,4$ ; рассчитанное значение  $\lg ft = 5,39$ .

1. Вишневецкий И. Н., Куртева А. А., Митрошин В. Е. и др. // ЯФ. - 1994. - Т. 57, № 1. - С.17 - 33.

# SHEAR VISCOSITY IN A SYSTEM OF INTERACTING NUCLEONS

A. G. Magner<sup>1</sup>, U. V. Grygoriev<sup>2</sup>, M. I. Gorenstein<sup>3</sup>, V. A. Plujko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

<sup>2</sup> *Taras Shevchenko National University, Kyiv*

<sup>3</sup> *Bogoliubov Institute for Theoretical Physics, Kyiv*

The hydrodynamical (HD) approach is often used for the description of a gas of particles in the nucleus-nucleus collisions at high excitation energies [1, 2]. The HD shear viscosity  $\eta$  was used also for evaluations of the attenuation of the collective excitations in the low frequency limit [the frequent collision regime (FC)],  $\omega \ll 1/\tau$ , where  $\tau$  is the relaxation time [3]. Recently, a ratio of the shear viscosity to the entropy density,  $\eta/s$ , was calculated for studying the properties of the hadron gas [2] and quark-gluon plasma [1]. The HD viscosity  $\eta$  is independent of the particle density  $n$ .

In the present talk the results based on the Boltzmann-Vlasov kinetic equation (BVKE) is used for calculations of the shear viscosity  $\eta$  in a system of interacting particles with the van der Waals (VDW) equation of state. Interactions between particles are associated with the hard-core repulsion (at a distance  $d$ ) and attractive mean-field potential of the VDW model. The linearized BVKE for the dynamical variation  $\delta f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$  of the distribution function in the phase space is solved in terms of the plane waves of a damping collective mode with a complex frequency  $\omega$  and a wave vector  $\mathbf{k}$ ,  $\delta f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = f_{eq}(p)\phi(\mathbf{p}/p) \exp[-i\omega t + i\mathbf{k}\mathbf{r}]$ , where  $f_{eq} \propto \exp[-p^2/(2mT)]$  is the Maxwell static distribution function. Substituting this plane wave solution into the BVKE, one gets the dispersion equation for the sound velocity  $u = \omega/(k\bar{v})$  where  $\omega = \omega_r - i\Gamma$  with the real part  $\omega_r$  and damping rate  $\Gamma = 1/\tau$ ,  $k = |\mathbf{k}|$ , and  $\bar{v} = (2T/m)^{1/2}$ . The viscosity is obtained analytically in the two opposite regimes: FC,  $\omega_r \ll 1/\tau$ , and rare collision (RC,  $\omega_r \gg 1/\tau$ ) ones. In the FC regime one obtains  $\eta \propto \tau$ , and finally,  $\eta = c_{FC}(an/T)(mT)^{1/2}/d^2$ , where  $m$  and  $d$  are the mass and diameter of the particle. The function  $c_{FC}$  depends on the particle density through the interaction constant  $a$  of the effective VDW potential,  $U_{eff} = -a\delta n(\mathbf{r}, t)$  with  $\delta n(\mathbf{r}, t) = n(\mathbf{r}, t) - n = \int d\mathbf{p} \delta f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$  for the dynamical part of the particle density  $n(\mathbf{r}, t)$ . In the FC regime, the leading term of the shear viscosity  $\eta$  in the perturbation expansion over  $\omega\tau$  is independent of the wave vector  $\mathbf{k}$ .

For the FC regime in the nucleon systems, the ratio  $\eta/s$  in the  $(n, T)$  plane has



a minimum with values of  $\eta/s$  smaller than 1 at the temperatures  $T = 20 - 40 \text{ MeV}$  and densities  $n = (0.5 - 2) n_0$  ( $n_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$  is the normal density of nuclear matter,  $a = 100 \text{ MeV fm}^3$ ,  $d = 1 \text{ fm}$ ). These results support an application of the hydrodynamic approach in this region of the nuclear-matter phase diagram. On the other hand, the values of  $\eta/s$  much larger than 1 are found at both small ( $n \ll n_0$ ) and large ( $> 2 n_0$ ) densities. In these regions of the phase diagram, a simple hydrodynamic treatment cannot be applied.

Note that the HD approach becomes questionable in the case when the particle collisions are not dominating in the collective BVKE dynamics, e.g., for the dilute nucleon gas with  $n \ll n_0$ . In this case, a finite size of systems, which can be created in the nucleus-nucleus collisions, a transition from the FC to the RC regimes should be taken into account.

1. *Csernai L.P., Kapusta J.I., McLergan L.D.* // Phys. Rev. Lett. - 2006. - Vol. 97. - P. 152303.
2. *Gorenstein M.I., Hauer M., Moroz O.M.* // Phys. Rev. C. - 2008. - Vol. 77. - P. 024911.
3. *Kolomietz V.M., Magner A.G., Plujko V.A.* // Z. Phys. A. - 1993. - Vol. 345. - P. 131, 137.

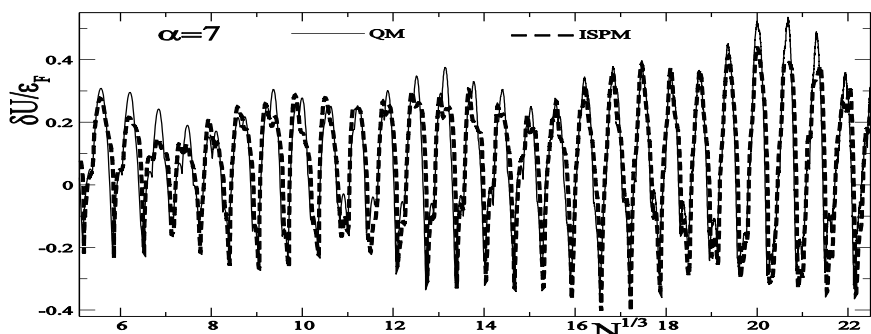
## SEMICLASSICAL SHELL STRUCTURES IN THE RADIAL POWER-LAW POTENTIALS

**A. G. Magner<sup>1</sup>, M. V. Koliesnik<sup>1</sup>, K. Arita<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

<sup>2</sup> *Department of Physics, Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan*

The semiclassical periodic orbit theory (POT) provides us with a nice tool for a deeper understanding, based on classical pictures, of the origin of nuclear shell structure. Some applications of the POT to nuclear masses and deformation energies were presented and discussed in relation to the bifurcations of periodic orbits (PO) with pronounced shell effects. In the present work, we derived the trace formulas of the level density for the radial power-law potentials (RPLP),  $V(r) \propto r^\alpha$ , which approximate well (with accounting a constant) the radial profile of a Woods- Saxon potential in the bound region within the improved stationary-phase method (ISPM) in three dimensions. The idea is to use the ISPM POT for the RPLP and obtain simple PO solutions of the classical dynamics by using a helpful scaling property provided that the quantum spectrum would be close to that for a realistic potential near the Fermi surface with a good accuracy.



Energy shell corrections  $\delta U$  (divided by the Fermi energy  $\varepsilon_F$ ) as functions of the particle number parameter  $N^{1/3}$  for the RPLP power  $\alpha = 7$ .

The semiclassical trace formulae for the oscillating (shell) components of the level density are obtained for any power  $\alpha$  of the RPLP from the harmonic oscillator potential at  $\alpha=2$  of the PO symmetry breaking to the well-known cavity potential for  $\alpha=\infty$  through all of bifurcation points. They present also the energy shell corrections  $\delta U$  in terms of POs as functions of the particle number  $N$  bound in the RPLP well. The ISPM solves the bifurcation (divergence and discontinuity) problems of the standard extended Gutzwiller theory in the density and energy shell-correction amplitudes versus the power parameter  $\alpha$ , in good agreement with quantum calculations at several critical values of  $\alpha$ . Figure shows good agreement between the semiclassical (ISPM) and quantum (QM) results for the oscillating component  $\delta U$  of the energy exactly at bifurcation  $\alpha=7$ , where the simplest triangle-like PO family is born from the primitive circular orbit as a typical bifurcation scenario. The main contribution to the energy shell corrections  $\delta U$  at this  $\alpha$  comes from the bifurcating POs, in nice agreement with the quantum Fourier transform of the level density. A remarkable super-shell effect is clearly seen from the figure.

1. *Magner A.G, Vlasenko A.A., Arita K. // Phys. Rev. E. - 2013. - Vol. 87. - P. 062916.*

## **ОБОЛОНКОВІ ЕФЕКТИ ТА СПЕКТРИ (МАСОВІ, ЗАРЯДОВІ) УЛАМКІВ ПОДІЛУ ІЗОТОПІВ Np, Pu ТА Am**

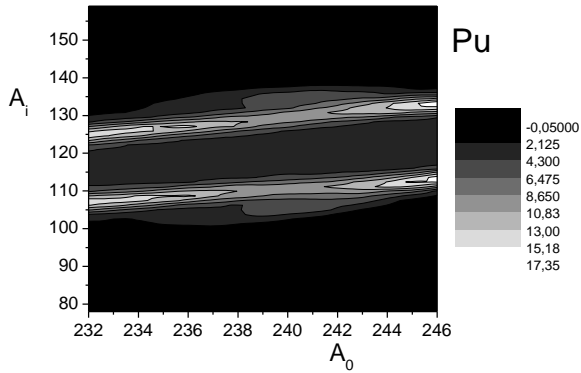
**В. Маслюк, М. Романюк, О. Парлаг, Т. Маринець**

*Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород*

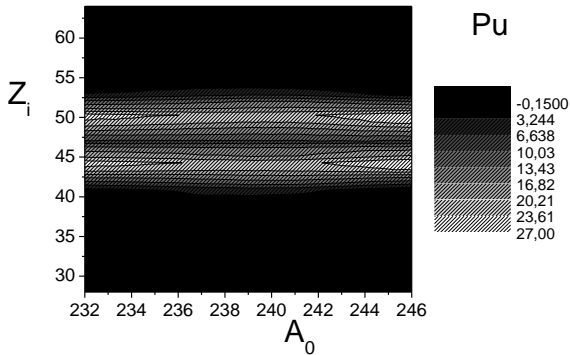
Представлено результати дослідження виходів уламків поділу (масові та зарядові спектри) для відомого числа ізотопів Np, Pu та Am, серед яких є ба-

зові та мінорні компоненти як для наявних, так і підкритичних збірок ядерного палива.

Розрахунки проведено в рамках запропонованого статистичного методу, що вивчає після подільний стан ядра, коли вже сформовано нуклонний склад ядер-уламків при умові, що їхні термодинамічні параметри є однаковими для кожного уламку. В цьому разі задача розрахунку виходів уламків поділу (УП) зводиться до аналізу канонічного ансамблю постійного тиску, утвореного при врахуванні всіх можливих схем розпаду вихідного ядра. При розрахунках враховується статистична нееквівалентність протонів (нейтронів) з різною питомою енергією зв'язку в кожному з ядер-уламків, а також наявність нейтронів поділу. В такому вигляді, теорія практично не містить підгоночних параметрів, оскільки ядерна температура  $T$  визначають по спектрах емісії нейтронів, чи протонів поділу, значення ж енергії зв'язку ядер-уламків табульовані в рамках різних систематик.



a



б

Масові (a) та зарядові (б) виходи УП ізотопів Pu при енергії збудження  $T = 1$  MeB.

Отримані дані дають змогу вивчати роль замкнутих нуклонних (протонних, нейтронних) оболонки або ж магічних чисел на формування масових/зарядових спектрів УП, зокрема, на їхню асиметрію (2-х, 3-х горбовий характер)/симетрію (одногорбовий характер). На рисунку, як приклад, представлено масові та зарядові розподіли УП понад 12 ізотопів Pu, де по осі OX – ізотопи Pu, по осі OY – (a) масові, (b) – зарядові фрагменти УП.

1. *Masljuk V.T., Parlar O.A. et al. Systematizing the Nuclei Fission Fragments: Post-Scission Approach // arXiv: 1202.0878v1[nucl-th]*

## ОСОБЛИВОСТІ ВИХОДІВ УЛАМКІВ ПОДІЛУ НАДТЯЖКИХ $Z = 118, 130$ ЯДЕР

**В. Маслюк, М. Романюк, О. Парлаг, Т. Маринець**

*Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород*

Синтез надтяжких атомних ядер ( $Z > 100$ ) важливий для дослідження проблеми стійкості ядерної матерії, зокрема, відкриття серед них «островка стабільності». Такі ядра майже не зустрічаються в природі, а синтезуються на експериментах із взаємодіючими зарядженими пучками важких ізотопів у наукових лабораторіях ОІЯД, Дубна (Росія), Берклі (США) та GSI (ФРГ), а також RIKEN, PSI, JAERT (Японія), GANIL (Франція). Пошукне число синтезованих надтяжких ядер, малі періоди напіврозпаду ( $< 1$  сек.) потребують особливих методів їхньої ідентифікації, наприклад, по їхніх ймовірних уламках поділу.

Дана доповідь присвячена дослідженню масових/зарядових спектрів продуктів розпаду надтяжких ядер. Розрахунок їх проводився у рамках пакету NUF1 із врахуванням можливостей довгої математики, паралельних розрахунків, можливості емісії нейтронів поділу та ланцюжків бета-розпаду. Розрахунок проводився в рамках запропонованої статистичної моделі [1] та останніх компіляцій енергій зв'язку понад 11 тис. ізотопів. В рамках цієї моделі досліджується не динаміка поділу ядра, а стан термодинамічного упорядкування ансамблю 2-х уламкових кластерів із врахуванням статистичної нееквівалентності протонів/нейтронів різних ядер-уламків (кольорова статистика).

У якості прикладу наведено виходи уламків поділу (зарядові, масові) надтяжких ядер  $Z = 118$  та  $130$ , порашовані при різних вихідних умовах – енергії збудження (температурі) вихідного ядра та різній кількості нейтронів поділу. Встановлено найбільш ймовірні комбінації ядер-уламків їхнього поділу. Обговорюються вплив статистичної нееквівалентності нуклонів різних ядер-уламків, ролі замкнутих нуклонних оболонки (магічних чисел) на формування масових/зарядових спектрів уламків поділу, зокрема, на їхню асиметрію (2-х, 3-х горбовий характер) /симетрію (одногорбовий характер). Досліджується еволюція вказаних спектрів для нейтрон - дефіцитного, чи -профі-

цитного вихідного надтяжкого ядра, при збільшенні його температури.

Автори вдячні Денисову В. Ю. та Скакуну Е. О. за ініціювання та підтримку досліджень надтяжких ядер.

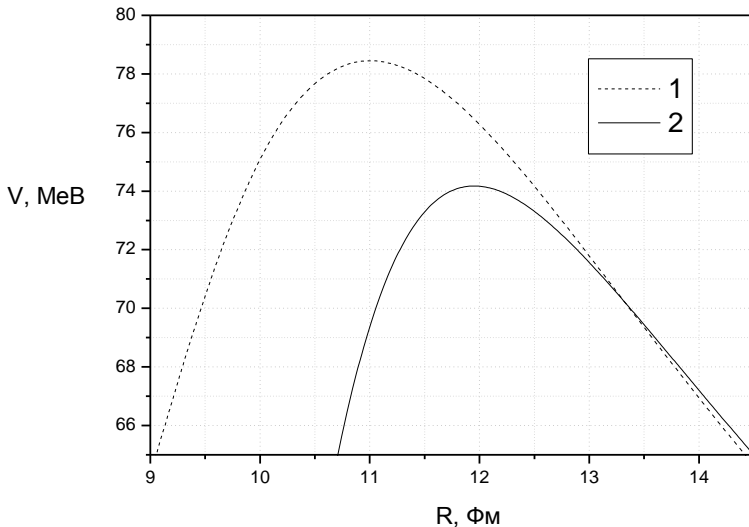
1. Masljuk V.T., Parlar O.A. et al. Systematizing the Nuclei Fission Fragments: Post-Scission Approach // arXiv: 1202.0878v1[nucl-th]

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ЯДЕРНО-ЯДЕРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ У РАМКАХ МЕТОДУ ПОДВІЙНОЇ ЗГОРТКИ

**В. О. Нестеров, В. Ю. Денисов**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

У рамках методу подвійної згортки розглядається потенціал ядерно-ядерної взаємодії для різних систем із використанням розподілів густини нуклонів, отриманих в рамках різних підходів, параметризацій нуклон-нуклонних сил DDM3Y, а також M3Y-Raid та M3Y-Paris із урахуванням внеску внутрішньої кінетичної енергії нуклонів у формі модифікованого методу Томаса - Фермі. Досліджено залежність потенціалу від форми нуклонних густин основного стану та використовуваної параметризації нуклон-нуклонних сил. Отримані результати підкреслюють важливість урахування внутрішньої кінетичної енергії нуклонів для побудови реалістичного потенціалу ядерно-ядерної взаємодії.



Потенціал взаємодії системи  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$  у рамках методу подвійної згортки з силами M3Y-Raid в околі бар'єру: (1) із урахуванням внутрішньої кінетичної енергії; (2) без урахування внутрішньої кінетичної енергії.

# КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ SUSY ЧАСТИНОК ЗА ДОПОМОГОЮ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ RUN I LHC

**Т. В. Обіход**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Робота LHC протягом Run I дала можливість відбору експериментальних даних для цілеспрямованого пошуку SUSY при енергіях 13 TeV. Вимірювання маси бозону Хіггса і топ-кварка, які привели до висновку про нестабільність електрослабого вакууму, значення маси бозону Хіггса, які знаходяться в межах мас суперсиметричної моделі, пошуки пропущеної поперечної енергії і заряджених суперчастинок є добрим індикатором для визначення чотирьох сценаріїв пошуків SUSY із непрямих експериментальних даних [1]. За допомогою CMSSM моделі при використанні комп'ютерних програм SDECAY [2] і PYTHIA 8.2 [3] було розраховано маси, ширини розпадів, перерізи утворення суперчастинок при енергіях в системі центра мас 13 TeV і 33 TeV. Отримані дані дають змогу зробити висновок про значне підвищення перерізу утворення суперчастинок при більших енергіях на LHC, а також дають змогу передбачити найбільш важливі канали розпаду легких суперчастинок, які не залежать від вибору суперсиметричної моделі, що є актуальним задля подальшого пошуку SUSY на LHC [4].

1. *Ellis John*. Prospects for Supersymmetry at the LHC & Beyond // LNL-preprint - arXiv: 1510.06204 [hep-ph].
2. *Muhlleitner M., Djouadi A., Mambrini Y*. SDECAY: a fortran code for the decays of the supersymmetric particles in the MSSM // Comput. Phys. Commun. -2005. - Vol. 168. - P. 46.
3. *Sjostrand T. et al*. An Introduction to PYTHIA 8.2 // LNL-preprint - arXiv:1410.3012 [hep-ph].
4. *Joseph D. Lykken*. Introduction to supersymmetry // LNL-preprint - arXiv: hep-th/9612114.

## БОЗОН ХІГГСА І ФІЗИКА ЗА МЕЖАМИ СТАНДАРТНОЇ МОДЕЛІ

**Т. В. Обіход**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Відкриття бозону Хіггса [1] є одним із найкращих інструментів для тестування Стандартної Моделі фізики елементарних частинок. Об'єднання результатів експериментів ATLAS і CMS для досягнення високої точності у визначенні властивостей SM-подібного бозону Хіггса, можливе відкриття другого бозону Хіггса суперсиметричної моделі [2] є необхідними для на-

ступного експериментального прориву в пошуках нової фізики за межами СМ. Нами представлено останні данні по розрахункам маси, каналів розпаду, перерізів утворення бозонів Хіггса в рамках Мінімальної Суперсиметричної Стандартної Моделі, які отримано за допомогою останньої версії комп'ютерної програми РYTHIA8.2 [3]. Було проведено розрахунки в області мас  $m_{H^*} = 450-700$  ГеВ і знайдено добре узгодження із експериментальними даними перерізу утворення бозону Хіггса  $\sigma(pp \rightarrow \bar{t}H^*)$  для  $l + jets$  кінцевих станів.

1. *Aad G. et al. (ATLAS Collaboration, CMS Collaboration). Combined Measurement of the Higgs Boson Mass in pp Collisions at  $s\sqrt{= 7$  and 8 TeV with the ATLAS and CMS Experiments // Phys. Rev. Lett. - 2015. - Vol. 114. - P. 191803.*
2. <http://www.unian.net/science/1211008-na-bolshom-adronnom-kollaydere-mogli-obnarujit-vtoroy-bozon-higgsa.html>.
3. *Sjostrand T. et al. An Introduction to PYTHIA 8.2 // LNL-preprint - arXiv:1410.3012 [hep-ph].*

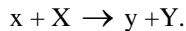
## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ ВБЛИЗИ ИЗОЛИРОВАННЫХ РЕЗОНАНСОВ, ИСКАЖЕННЫХ НЕРЕЗОНАНСНЫМ ФОНОМ**

**С. А. Омельченко, В. С. Ольховский**

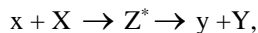
*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Представлены расчеты сечений для упругого рассеяния нейтронов ядрами  $^{12}C, ^{52}Cr, ^{56}Fe, ^{63}Cu, ^{64}Ni$  с использованием метода временного анализа в ядерных реакциях с изолированными компаунд-ядерными резонансами, искаженными нерезонансным фоном.

Рассматривались ядерные реакции с 2-частичным выходным каналом типа



Используя тот факт, что самосогласованное временное приближение [1 - 3] достаточно точно описывает интерференцию между прямыми и резонансными процессами



(где  $Z^*$  - промежуточное компаунд-ядро, распадающееся после задержки) можно развить этот метод для дальнейшего исследования влияния интерференционных эффектов в амплитудах рассеяния на времена протекания и сечения ядерных реакций.

Опорные положения метода:

1а) при рассмотрении данного явления во временном подходе выясняется наличие качественного отличия результатов, полученных в L-системе (лабораторной системе) отсчета и в С-системе (системе центра масс),

1b) в С-системе источник выходящих волн неподвижен и потому интерференцией здесь является суперпозиция амплитуд двух процессов,

1с) в L-системе движение компаунд-ядра вызывает сдвиг источника выходящих волн для процессов резонансного распада относительно источника выходящих волн для прямых процессов.

Кроме того, также исследуется роль фазового параметра  $\varphi$ , описывающего пространственно-временной сдвиг между нейтронами и частицами, испускаемыми источником в лабораторной системе.

Текущая работа базируется на развитии и обобщении фазового анализа на основе обнаруженного в работах [1 - 3] явления задержки-опережения при упругом рассеянии нуклонов ядрами вблизи резонанса, искаженного нерезонансным фоном, в системе центра масс. Экспериментальные данные по упругому рассеянию нейтронов были любезно предоставлены А. И. Кальченко (ИЯИ НАН Украины) [4].

1. *Olkhovsky V. et al. // Nucl. Phys. - 1992. - Vol. A549. - P. 375.*
2. *Olkhovsky V. et al. // Nucl. Phys. - 1993. - Vol. A564. - P. 217.*
3. *Omelchenko S.A., Eremin N.V., Olkhovsky V.S. Temporal description of interference phenomena in nuclear reactions with two-particle channels // Modern Physics Letters for Nuclear Physics. - 1994. - Vol. E 9, No. 31. - P. 2849 - 2856.*
4. *Harvey J.A., Larson D.C. - ORNL, 1974. Private communication, EX#OR 13759.002*

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕРНОГО ПОДІЛУ В РАМКАХ НЕМАРКІВСЬКОЇ ТЕОРІЇ КРАМЕРСА

С. В. Радіонов

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

У рамках теорії Крамерса розглянута задача спонтанного симетричного поділу важких високозбуджених ядер. Було знайдено стаціонарне рішення рівняння Фокера - Планка для немарківської теплової дифузії через параболічний енергетичний бар'єр. Було обчислено ширину ядерного поділу як швидкість дифузії через бар'єр в залежності від величини часу пам'яті. Знайдена аналітична оцінка для ширини поділу добре узгоджується з чисельними розрахунками цієї величини в рамках немарківського рівняння Ланжевена. Також було запропоновано аналітичні вирази для середнього значення та дисперсії передрозривної кінетичної енергії ядра в залежності від величини часу пам'яті.



## СЕЧЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА, УСРЕДНЕННОЕ ПО АТОМНЫМ ЭЛЕКТРОНАМ

С. Н. Федоткин

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

В некоторых задачах, связанных с взаимодействием фотонов или заряженных частиц с атомными электронами возникает необходимость определения суммарной для всего атома вероятности процесса. В этом случае вычисляется вероятность соответствующего процесса для каждого электрона, а затем суммируются все эти вероятности. Для многоэлектронных атомов такой расчет является весьма трудоемким из-за большого числа громоздких вычислений. Кроме того, существует принципиальная проблема, связанная с невозможностью точно учесть электрон – электронное взаимодействие. Поэтому подобные задачи решаются приближенными численными методами.

В работе [1] был предложен альтернативный простой метод, позволяющий в некотором приближении вычислять усредненную по всем электронам атома полную вероятность однофотонной аннигиляции позитронов и атомных электронов. При этом было получено достаточно хорошее согласие с приближенными квантово-механическими расчетами. В настоящей работе этот подход применяется для расчета усредненного по всем атомным электронам сечения фотоэффекта. Для этого используется статистический метод Томаса-Ферми, в котором рассчитывается средняя плотность электронов атома как функция координат. Вычисления выполняются в приближении Тейтца [2] для среднего потенциала, в котором движутся атомные электроны. В этом потенциале можно аналитически вычислить среднюю плотность электронов атома  $n(r)$  как функцию координат  $r$ , а затем с ее помощью определить суммарное для всего атома среднее сечение фотоэффекта. Расчет сечения фотоэффекта сделан в нерелятивистском приближении  $I \ll \omega \ll m$ , где  $I$  - энергия связи К-электрона,  $\omega$  - энергия налетающего на атом фотона, а  $m$  - масса электрона ( $\hbar = c = 1$ ). Это сечение сравнивается с суммарным для всех электронов приближенным сечением фотоэффекта, вычисленным в рамках квантовой механики. Для достаточно больших зарядов ядра  $50 \leq Z \leq 70$ , где приближение Томаса - Ферми является корректным, различие средних сечений рассматриваемого процесса, вычисленных в этих двух подходах, не превышает 20 %.

Таким образом, для больших зарядов ядра  $Z$  предложенный приближенный метод позволяет достаточно просто определять суммарное для всего атома среднее сечение процесса фотоэффекта.

1. Fedotkin S.N. // LXV Int. Conf.: Book of Abstracts. - St. Pb., 2015. - P. 155.
2. Tietz T. // Zs. Naturforsch. - 1968. - Vol. 23a. - P. 191.

## СИСТЕМА ТЕСТУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРНИХ ГАЗОВИХ ДЕТЕКТОРІВ

С. Барсук<sup>1</sup>, О. Безшийко<sup>2</sup>, Л. Голінка-Безшийко<sup>2</sup>,  
І. Каденко<sup>2</sup>, В. Крилов<sup>1,2</sup>, М. Тітов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Лабораторія лінійного прискорювача (LAL), Орсе, Франція*

<sup>2</sup> *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

<sup>3</sup> *Комісаріат атомної та альтернативної енергетики,  
Інститут вивчення фундаментальних законів фізики (CEA IRFU),  
Сакле, Франція*

У даний час відбувається оновлення існуючих та проектування майбутніх експериментів фізики високих енергій, що зумовлює швидкий розвиток детекторних технологій. Одним з найбільш багатообіцяючих варіантів для побудови трекових систем є мікроструктурні газові детектори та їх комбінації з напівпровідниковими детекторами (Micromegas/InGrid технологія). В умовах такого розвитку необхідно вчасно досліджувати характеристики та виявляти недоліки різних детекторних технологій для оптимізації прототипів та повноцінних детекторних систем.

У даній роботі розглядаються існуючі підходи до побудови автоматизованих систем для тестування газових мікроструктурних детекторів та їх модифікацій, проводиться аналіз характеристик систем, обговорюються їхні переваги та недоліки в умовах України, пропонуються шляхи автоматизації багатодетекторних систем. У роботі запропоновано оптимізовану схему такої тестової платформи, безпечне автоматизоване використання газової підсистеми, підсистеми живлення високою напругою, зчитування даних та їхнього аналізу «на-льоту». Деталізовано процедури тестування та роботи детекторної системи Micromegas/InGrid з піксельною зчитувальною електронікою TimePix, запропоновано спрощену систему зчитування даних с детектора. Розглянуто шляхи аналізу інформації про трек частинки та її енергетичні втрати, отримання з початкових даних інформації про тип частинки за допомогою кластерного аналізу.

Даний аналіз дасть змогу створити повноцінну апаратно-програмну тестову платформу для мікроструктурних детекторів в Україні, що дасть змогу долучитись до сучасних детекторних досліджень в даному напрямку а також отримати нові рішення при розв'язку проблем створення таких систем, які можуть стати альтернативою існуючим підходам.

## PROMPT GAMMA-RAYS FROM INTERACTIONS OF 14 MeV NEUTRONS WITH NICKEL

**B. M. Bondar<sup>1,2</sup>, O. M. Gorbachenko<sup>1</sup>, I. M. Kadenko<sup>1</sup>,  
B. Yu. Leshchenko<sup>1,3</sup>, V. A. Plujko<sup>1</sup>, K. M. Solodovnyk<sup>1</sup>**

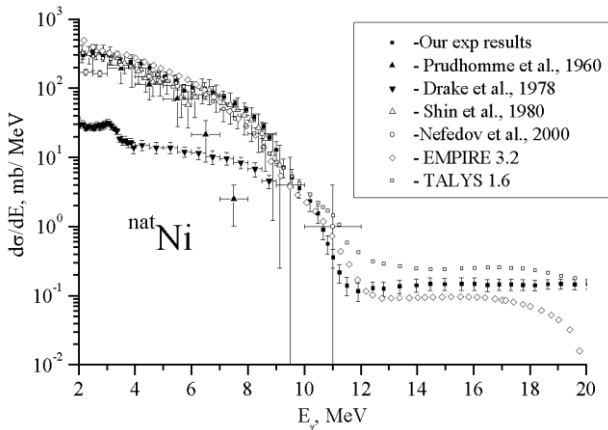
<sup>1</sup> Nuclear Physics Department, Taras Shevchenko National University, Kyiv

<sup>2</sup> All-Ukrainian Center for Radiosurgery of the Clinical Hospital "Feofania", Kyiv

<sup>3</sup> National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

The determination of prompt  $\gamma$ -ray yield cross sections during neutron interactions with nuclei is of great importance for the nuclear reactor calculations as well as for investigation of fundamental properties of nuclear processes, that allows to study different nuclear reaction mechanisms, level density of excited states and their decay.

In this contribution we present the results of prompt  $\gamma$ -ray measurements from  $(n, \gamma)$  reactions on  $^{nat}\text{Ni}$ . The experimental measurements were carried out using time-of-flight technique based on neutron pulse generator PNG-200, that was adjusted and applied in our recent experiments for other elements [1]. The differential cross sections were unfolded from amplitude spectrum and cross section uncertainties were estimated. The experimental results were compared with the corresponding data of other authors from EXFOR database and with theoretical calculations, which were performed using EMPIRE 3.2 and TALYS 1.6 codes [2, 3] for statistical models of compound and precompound decays.



The influence of the characteristics of nuclear excited states on calculated gamma ray spectrum was studied using different models for photon strength function (PSF) and nuclear level density (NLD) [4, 5]. According to our analysis, the best agreement between experimental results and theoretical values of cross

sections was obtained using MLO1 model for PSF and EGSM model for NLD, which are recommended as default ones for the EMPIRE 3.2 code.

1. Bondar B.M., Bondar V.M. et al. // Nucl. Phys. At. Energy. - 2011. - Vol. 12(2). - P. 129.
2. Herman M., Capote R. et al. // Nuclear Data Sheets. - 2007. - Vol. 108. - P. 2655; <http://www.nndc.bnl.gov/empire/>.
3. Koning A.J., Hilaire S., Duijvestijn M.C. // Proc. of the Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology (Nice, France, 22 - 27 May, 2007). - P. 211; <http://www.talys.eu/>.
4. Plujko V.A., Gorbachenko O.M. et al. // Nuclear Data Sheets. - 2014. - Vol. 118, Issue 1. - P. 237.
5. Plujko V.A., Gorbachenko O. M. et al. // Nuclear Data Sheets. - 2014. - Vol. 118, Issue 1. - P. 240.

## ЩОДО МОЖЛИВОСТЕЙ ГЕНЕРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДА $^{99}\text{Mo}$ НЕЙТРОНАМИ НА ПУЧКУ ПРИСКОРЮВАЧА

Г. М. Веремсїченко<sup>1</sup>, І. П. Дряпаченко<sup>1</sup>, О. В. Коваленко<sup>1</sup>,  
М. Ф. Коломісць<sup>1</sup>, О. А. Кушпій<sup>1</sup>, В. П. Левченко<sup>2</sup>, В. В. Осташко<sup>1</sup>,  
Ю. М. Павленко<sup>1</sup>, А. Ф. Шаров<sup>1</sup>, В. М. Шевель<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

<sup>2</sup> ТОВ «Радіофарм», Київ

В Інституті ядерних досліджень НАН України розроблена та реалізована технологія виробництва радіонукліда  $^{99}\text{Mo}$  як кінцевого продукту реакції  $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$  при опроміненні природного або збагаченого молібдену в каналах активної зони дослідницького реактора ВВР-М [1, 2]. Отриманий радіонуклід –  $^{99}\text{Mo}$  – є материнським ядром для отримання радіонукліда технецію ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ), який використовується у 80 % застосувань *in-vivo* діагностики. Це відповідає 30 мільйонам тестів по всьому світу кожного року. Тільки в Німеччині виконується кожного тижня 60000 тестів з використанням  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  [3]. Він використовується, головним чином, для дослідження функції щитовидної залози, але й для діагностики захворювань інших органів, таких як легені, серце, печінка, жовчний міхур та скелет [ibid]. Головним статистичним показником розвитку цього напрямку в системі охорони здоров'я в країнах ЄС та США є кількість радіологічних досліджень, які проводяться протягом року на одну тисячу пацієнтів. Якщо у розвинутих країнах цей показник становить у середньому 40 - 50, то в Україні, за різними оцінками, він не перевищує трьох досліджень на рік.

Ядерно-фізичні властивості радіонукліда  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , насамперед період напіврозпаду 6 годин, вимагають концептуального пошуку альтернативних засобів генерації материнського радіонукліда  $^{99}\text{Mo}$  з наближенням у просторі й часі

до місця використання. Найбільш перспективним напрямком такого пошуку є застосування швидких нейтронів, отриманих при DD- та TD-генерації [4,5]. Логічним подальшим розвитком цього напрямку повинна стати розробка компактних (й транспортабельних) установок для конкретного локального використання.

У роботі розглядаються можливість та необхідні характеристики та умови для подібної методики з використанням пучків прискорювачів заряджених частинок для генерації нейтронами радіонукліда  $^{99}\text{Mo}$ .

1. *Shevel V.N.* Development of the radioisotope production technologies at the WWR-MK research reactor // Int. Nucl. Safety J. - 2014. - Vol. 3, Issue 2. - P. 43 - 48.
2. *Вишневський І.М., Гайдар Г.П., Коваленко О.В. та ін.* Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України. - К.: Ін-т ядерних досл., 2014. - 176 с.
3. Technische Universität München // <https://www.frm2.tum.de/en/industry-medicine/radioisotope-production/molybdenum-99/>
4. *Pagdon K., Gentile C., Cohen A. et al.* // Report PPPL-4689. - 2011. - [http://bp.pppl.gov/pub\\_report//2011/PPPL-4689.pdf](http://bp.pppl.gov/pub_report//2011/PPPL-4689.pdf)
5. *Harvey James.* Production of Parent Isotopes for Radionuclide Generators // SNMMI Winter Meeting. - 2013.

## ИЗМЕРЕНИЕ КВК ВНУТРИРОТАЦИОННОГО М1-ПЕРЕХОДА В $^{181}\text{Ta}$

**И. Н. Вишневский, С. С. Драпей, В. А. Желтоножский,  
А. Н. Саврасов, В. П. Хоменков**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Процесс внутренней конверсии гамма-лучей проходит на электронах атомных оболочек. Часть таких электронов находится внутри ядра и этот процесс называется внутриядерной конверсией. Внутриядерная конверсия гамма-лучей – это дополнительный путь для изучения ядра.

Для получения этой информации необходимо с высокой точностью измерять коэффициенты внутренней конверсии гамма-лучей, т.к. вклад внутриядерной конверсии, как правило, не превышает 3 - 5 %. Нами для исследования внутриядерной конверсии проведены измерения КВК М1-заторможенного по одночастичным оценкам ( $F_W = 11$ ) внутриядерного перехода в  $^{181}\text{Ta}$ . Для исследований на изотопе  $^{180}\text{Hf}$  в ( $n, \gamma$ )-реакции наработан  $^{181}\text{Hf}$  ( $T_{1/2} = 42,4$  сут.). Измерения КВК  $\gamma$ -перехода с энергией 136,26 кэВ были выполнены, используя гамма-спектрометрический метод, основанный на исследовании спектров суммирования ( $\gamma + \gamma$ )- и ( $\gamma + K_x$ )-излучения.

В результате проведенных исследований было получено, что для  $\gamma$ -перехода с энергией 136 кэВ  $\alpha_k^{\text{эксп}} = 1,52 \pm 0,05$ ,  $\alpha_k^{\text{табл}} = 1,389$ ,  $\alpha_{\text{tot}}^{\text{эксп}} = 1,60 \pm 0,04$ ,

$\alpha_{\text{от}}^{\text{табл}} = 1,756$ . Наблюдается систематическое отличие экспериментальных значений от табличных. Проводится обсуждение полученных данных.

## НАПРАЦЮВАННЯ $^{179\text{m}2}\text{Hf}$ В ( $\alpha$ , p), ( $\gamma$ , n) ТА ( $n$ , $\gamma$ )-РЕАКЦІЯХ

**І. М. Вишневський, В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Вивчення перерізів та виходів заселення високоспінових К-ізомерних станів дає змогу отримати різноманітну інформацію як про структуру збуджених рівнів в неперервній та дискретній областях збудження, так і про механізми протікання ядерних реакцій. Одним із таких К-ізомерів є  $^{179\text{m}2}\text{Hf}$  і тому метою нашої роботи являється дослідження перерізів напрацювання  $^{179\text{m}2}\text{Hf}$  в реакціях з нейтронами, альфа-частинками та гальмівними гама-квантами в широкому діапазоні величин енергії бомбардуючих частинок.

Вимірювання перерізів та виходів напрацювання  $^{179\text{m}2}\text{Hf}$  ( $T_{1/2} = 25$  д.,  $J^\pi = 25/2^-$ ) проводилось на мішенях природного ізотопного складу лютецію після опромінення їх альфа-частинками з величиною енергії 26 МеВ, гафнію після опромінення гальмівними гама-квантами з граничною величиною енергії 15,1 та 17,5 МеВ та гафнію збагаченому  $^{178}\text{Hf}$  (92,4 %) після опромінення їх нейтронами реакторного енергетичного спектру. Опромінення альфа-частинками та нейтронами проводилось, відповідно, на прискорювачі У-120 та реакторі ВВР Київського інституту ядерних досліджень а гальмівним гама-квантами на мікротроні М-30 Ужгородського інституту електронної фізики НАН України. Вимірювання активностей проводилось в окремій низькофоновій лабораторії за допомогою HPGe-спектрометрів з енергетичною роздільною здатністю 1,8 - 2 кеВ на гама-лініях  $^{60}\text{Co}$  та ефективністю реєстрації 15 - 40 % порівняно з NaI(Tl)-детектором розмірами 3"×3".

Отримані величини перерізів та ізомерних відношень виходів наведені в таблиці.

| Реакція                      | $^{178}\text{Hf}(n, \gamma)^{179}\text{Hf}^{\text{m}2, \text{g}}$ | $^{180}\text{Hf}(\gamma, n)^{179}\text{Hf}^{\text{m}2, \text{g}}$ | $^{176}\text{Lu}(\alpha, p)^{179}\text{Hf}^{\text{m}2}$ | $^{175}\text{Lu}(\alpha, 2n)^{177}\text{Ta}$ |         |
|------------------------------|---|---|---|--|---------|
| E, MeV                       | Реакт.  | 15,1  | 17,5  | 26 ± 1,2                                     |         |
| $Y_{\text{m}2}/Y_{\text{g}}$ |   | $6,1(3) \cdot 10^{-6}$  | $3,7(2) \cdot 10^{-6}$                                  |  |         |
| $\sigma$ , мб                | 0,121(12)   | $1,1(3) \cdot 10^{-3}$  | $0,7(2) \cdot 10^{-3}$                                  | 1,1(1)                                       | 370(20) |

Зниження  $Y_{m2}/Y_g$  із зростанням граничної енергії гальмівних  $\gamma$ -квантів вказує на однокорбий вид функції збудження реакції  $^{180}\text{Hf}(\gamma, n)^{179}\text{Hf}^{m2}$  на відміну від однокорбого реакції  $^{180}\text{Hf}(\gamma, n)^{179}\text{Hf}^g$ .

Проводиться обговорення отриманих результатів.

## НИЗКОФОНОВЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ И ГАММА-КВАНТОВ

**А. Ш. Георгадзе, В. М. Павлович**

*Институт ядерних досліджень НАН України, Київ*

Для обеспечения нераспространения ядерных и радиоактивных материалов применяются портальные мониторы (ПМ), устанавливаемые в точках контроля (на границе, в аэропортах, железнодорожных переездах и т.п.). Проведение инспекций большегрузного транспорта и контейнеров – являются наиболее длительными по времени и дорогостоящими процедурами. В ПМ для обнаружения радиоактивных веществ по  $\gamma$ -излучению обычно используются пластиковые сцинтилляторы большого объема, а для контроля делящихся материалов устанавливаются нейтронные  $^3\text{He}$  счетчики с замедлителем либо бор содержащие пластиковые сцинтилляторы. Однако высокая стоимость бор содержащих сцинтилляторов большого объема и нехватка  $^3\text{He}$  ограничивает их широкое использование, что в последнее время привело к интенсивному поиску других эффективных методов детектирования нейтронов и  $\gamma$ -квантов.

Нами разработана концепция низкофоновой секционированной спектроскопического детектора большого объема, основанного на использовании пластмассового сцинтиллятора, способного одновременно проводить измерение как гамма- и так и нейтронного излучения. Детектор состоит из 40 пластмассовых сцинтилляционных стержней размером  $6 \times 10 \times 200$  см, покрытых светоотражающей и гадолиний содержащей пленками, собранных в блок размером  $24 \times 100 \times 200$  см. Установленные с торцов стержней сплошные пластмассовые световоды толщиной 10 см обеспечивают распределение сцинтилляционного света одновременно между всеми фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), формируя специфические амплитудно-пространственное распределения (АПР) сигналов ФЭУ. Выделение нейтронов происходит с помощью задержанного совпадения от процессов упругого рассеяния нейтрона на протонах и реакции захвата нейтрона на ядре гадолиния.

Основная идея предлагаемого детектора состоит в использовании метода программной коллимации путем статистического анализа АПР сигналов ФЭУ для локализации источника в пространстве, разделения нейтронов и  $\gamma$ -квантов для подавления фона. При этом большая площадь и объем детектора позволяют добиться высокой чувствительности при малых уровнях мини-

мально детектируемой активности и, как следствие, сократить время необходимое для обнаружения и отождествления делящихся материалов, сократить затраты и задержки при проведении инспекции транспорта.

Совокупность таких качеств, как использование пластмассового сцинтиллятора с гадолиний содержащей пленкой, высокая секционированность детектора и применение статистических методов анализа данных позволяют одновременно проводить раздельную регистрацию нейтронов и  $\gamma$ -квантов от искусственных источников, обеспечивая эффективное выделение таких событий из естественного нейтронного и гамма фона.

Предложенная концепция детектора нейтронов и  $\gamma$ -квантов основана на ангеровских методах, применяемых в эмиссионно-позитронной томографии и гамма-камерах. Этот метод позволяет значительно уменьшить количество фотодетекторов и каналов регистрации, упростить систему накопления и обработки данных, обеспечить простоту в обслуживании детектора.

1. Prevention of inadvertent moving and illegal circulation of radioactive materials // IAEA-TECDOC-1311. - Vienna: IAEA, 2002. - P. 1 - 26.
2. Обнаружение радиоактивных материалов на границе // IAEA-TECDOC-1312. - Vienna: IAEA, 2002. - P. 1 - 17.
3. *Колеватов Ю.И., Семенов В.П., Трыков Л.А.* Спектрометрия нейтронов и гамма-излучения в радиационной физике. - М.: Энергоатомиздат, -1991. - 296 с.

## **РОЗСІЯННЯ ДЕЙТРОНІВ З ЕНЕРГІЄЮ 45 МеВ ЯДРАМИ $^{12}\text{C}$**

**В. І. Гранцев, К. К. Кісурін, С. Є. Омельчук, О. А. Понкратенко, Ю. С. Рознюк, Б. А. Руденко, Л. І. Слюсаренко, Б. Г. Стружко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Структура збуджених станів ядра  $^{12}\text{C}$  нині обговорюється в ряді теоретичних та експериментальних досліджень. Особлива увага приділяється дослідженню рівня  $0^+$  при  $E_x = 7,654$  МеВ ядра  $^{12}\text{C}$ , що важливо як з точки зору ядерного синтезу, так і ядерної структури та реакцій. Цей стан локалізується на 287 кеВ вище за поріг  $\alpha + {}^8\text{Be}$  та на 379 кеВ вище за поріг розщеплення на три  $\alpha$ -частинки. Розуміння важливості структури рівня Хойла притягує зусилля експериментаторів.

У цій роботі ми повідомляємо про нові експериментальні дані з пружного та непружного розсіяння дейтронів з енергією  $E_d = 45,3$  МеВ на ядрі  $^{12}\text{C}$ . Дослідження проведено на прискорювачі У-240 ІЯД НАН України. Отримано кутові розподіли пружного розсіяння та непружного на рівнях  $2^+$  (4,44 МеВ);  $0^+$  (7,654 МеВ, рівень Хойла) та  $3^-$  (9,64 МеВ).

Ми провели порівняння з малочисельними даними з пружного та непружного ( $d, d'$ ) розсіяння, що є в літературі [1, 2]. Відмічено характерні структу-



рні особливості кутових розподілів на рівні  $0^+$  (7,65 MeV). Аналіз кутових розподілів пружного та непружного розсіяння виконано за оптичною моделлю та методом зв'язаних каналів. Проводиться порівняння з результатами теоретичного аналізу, що наведено в роботах [1, 2].

Експериментальні кутові розподіли для  $0^+$  та  $2^+$ , основного та першого збуджених станів ядра  $^{12}\text{C}$ , можна узгоджено описати в рамках обертового збудження та зв'язку каналів. Для опису рівня  $3^-$  (9,64 MeV) використовуються обертово – коливальні схеми зв'язку та від'ємне значення деформації, що відповідає гіпотезі про сплющену форму ядра  $^{12}\text{C}$ . Що стосується стану  $0^+$  (7,65 MeV), то структура його складна. Потрібно враховувати не тільки структуру ядра  $^{12}\text{C}$ , але й взаємодію слабо зв'язаного дейтрона з нуклонами в альфа-кластерах. Про це говорить задовільне узгодження теоретичного кутового розподілу на рівні  $0^+$  (7,65 MeV), що виконано в оболонковій моделі [1], з експериментальним. В оболонковій моделі непружний перехід вводиться завдяки ефективній взаємодії, що є сумою нуклон – нуклонної взаємодії між взаємодіючими ядрами (нуклонами налітаючої частинки та нуклонами ядра).

Структура рівнів  $3^-(9,64)$  та  $0^+(7,65 \text{ MeV})$  потребують додаткового дослідження.

1. *Hinterberger F., Mairle G., Schmidt-Rohr U. et al.* Nucl. Phys.A. - 1968. - Vol. 115. - P.570
2. *Aspelund O., Hrehuss G., Kiss A. et al.* - Nucl. Phys. A. - 1975. - Vol. 253. - 263.

## ПОРІВНЯННЯ ЖУРНАЛУ ІЯД НАН УКРАЇНИ «ЯДЕРНА ФІЗИКА ТА ЕНЕРГЕТИКА» З ІНШИМИ ЖУРНАЛАМИ

**О. Д. Григоренко<sup>1</sup>, В. І. Третяк<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАНН України, Київ*

<sup>2</sup> *НІЯФ, відділення у Римі «Ла Салієнца», Рим, Італія*

За останні 10 років (з 2006 по листопад 2015 рр.) вийшло 36 випусків журналу ІЯД НАН України «Ядерна фізика та енергетика», в яких було опубліковано 544 статті. Наведено розподіл статей за мовами (українська – 40 %, російська – 37 %, англійська – 23 %) та тематикою (ядерна фізика – 41 %, атомна енергетика – 10 %, радіаційна фізика – 8 %, радіаційна біологія та екологія – 23 %, техніка та методи експерименту – 18 %). Представлено показники впливовості журналу на науковий процес за базою даних SCOPUS (Impact per Publication, індекс Хірша тощо) й надано порівняння з іншими журналами близької тематики, що видаються в Україні, Росії та інших країнах. Пропонуються деякі заходи, що могли б покращити показники журналу.

# ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСУ $^{52}\text{Cr}$ З НАБОРУ ПЕРЕРІЗІВ, ОТРИМАНИХ ШЛЯХОМ ЗСУВУ СЕРЕДНЬОЇ ЕНЕРГІЇ ФІЛЬТРОВАНИХ НЕЙТРОНІВ

О. О. Грицай<sup>1</sup>, А. К. Гримало<sup>1</sup>, В. А. Пшеничний<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

<sup>2</sup> Державний науково-інженерний центр  
систем контролю та аварійного реагування, Київ

Визначено параметри  $E_0$ ,  $\Gamma_n$  та  $R'$  резонансу  $^{52}\text{Cr}$  при енергії 50,156 кеВ з набору усереднених повних нейтронних перерізів, отриманих на фільтрованому реакторному пучку шляхом зсуву середньої енергії фільтрованих нейтронів. Зсув нейтронної лінії фільтру здійснювався шляхом розсіяння нейтронів на зразках-розсіювачах. Вимірювання повних нейтронних перерізів  $^{52}\text{Cr}$  проводились на 8-му горизонтальному експериментальному каналі (ГЕК) реактора ВВР-М на установці кутових розподілів УКР-3 [1] з використанням методу пропускання.

Для формування квазімоноенергетичної нейтронної лінії з середньою енергією 59 кеВ було використано композиційний фільтр з наступним складом:

| S                        | $^{58}\text{Ni}$        | V                       | Al                    | $^{10}\text{B}$       |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 116,53 г/см <sup>2</sup> | 81,42 г/см <sup>2</sup> | 24,44 г/см <sup>2</sup> | 5,4 г/см <sup>2</sup> | 0,5 г/см <sup>2</sup> |

В якості зразків-розсіювачів використовувались 2 розсіювачі - поліетилен  $\text{CH}_2$  та вуглець С. Останній використовувався для врахування ефекту від розсіяння нейтронів на вуглеці, що входить у склад поліетилену, щоб надалі виділити ефект від нейтронів, розсіяних на водні. Вимірювання проводились на кутах розсіяння 15, 20, 25 та 30°, що для лінії з середньою енергією 59 кеВ при розсіянні на водні дає змогу отримати нейтрони з середніми енергіями 55, 52, 48,4 та 44,2 кеВ відповідно.

Оцінку параметрів резонансу  $^{52}\text{Cr}$  проведено методом найменших квадратів. Отримані параметри порівняно із даними БОЯД та даними інших авторів.

1. *Gritzay O.O., Grymalo A.K., Koloty V.V. et al.* Research of Isolated Resonances Using the Average Energy Shift Method for Filtered Neutron Beam // Proc. of the 3rd Int. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy" (June 7 - 12, 2010, Kyiv, Ukraine). - Kyiv, 2011. - P. 483.

## ВИПРОМІНЮВАННЯ НЕЙТРОНІВ З ЯДЕР $^9\text{Be}$ ПРИ АНІГЛЯЦІЇ ПОЗИТРОНІВ ЗІ ЗВ'ЯЗАНИМИ АТОМНИМИ ЕЛЕКТРОНАМИ

**В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Проведено дослідження впливу позитронів з неперервним енергетичним спектром і граничною енергією 4,15 МеВ на ядра  $^9\text{Be}$ . Джерелом позитронів

були ядра  $^{66}\text{Ga}$ , який напрацьовувався на прискорювачі У-120 в (p, n)-реакції на металічному цинку збагаченому до 99 %  $^{66}\text{Zn}$  при значенні енергії протонів 6,8 МеВ. Активність  $^{66}\text{Ga}$  ( $T_{1/2} = 9,5$  год) після цього транспортувалась в окрему лабораторію в якій знаходиться активний колодязний лічильник збігів нейтронів. Він дає змогу з високою ефективністю міряти швидкість ліку нейтронів як в режимі збігів, так і в одиночному режимі. В останньому режимі було проведено 3 експерименти тривалістю по 1,5 год кожен в одному і тому ж свинцевому контейнері, який під час експериментів вставлявся в колодязь нейтронного лічильника. В першому лише активність  $^{66}\text{Ga}$  ( $(5 - 14) \cdot 10^7$  Бк) опромінювала нейтронний лічильник з метою оцінювання його відгуку на вплив високоенергетичних  $\gamma$ -квантів, в другому ядра  $^{66}\text{Ga}$  оточувались двома мішенями берилію – основний експеримент, в третьому між активністю  $^{66}\text{Ga}$  та Ве вставлялись 2 мішені свинцю товщиною 5 мм, кожна, які повністю поглинали позитрони і незначно послаблювали потік високоенергетичних  $\gamma$ -квантів, які також супроводжують розпад  $^{66}\text{Ga}$ . Наступного дня ці ж 3 експерименти були повторені з метою підтвердження отриманих результатів і кореляції їх з періодом напіврозпаду  $^{66}\text{Ga}$ .

Калібрування нейтронного лічильника за ефективністю реєстрації проводилось за допомогою калібрувального AmLi джерела нейтронів. Потік позитронів визначався через декілька днів за допомогою спектрометра зібраного на базі HPGe-детектора після зниження активності  $^{66}\text{Ga}$  до прийнятого рівня та перераховувався на час проведення експериментів, використовуючи період напіврозпаду  $^{66}\text{Ga}$ . Використовувались інтенсивності  $\gamma$ -ліній 1039 та 833 кеВ, які супроводжують розпад  $^{66}\text{Ga}$ .

Після проведення декількох серій опромінь та вимірювань та врахування усіх поправок отримана величина  $\sigma^{\text{еф}}(\beta^+) = 8,5(1,9) \cdot 10^{-28}$  см<sup>2</sup> в два раза вища ( $\sigma(\gamma, n) = 4,3(4) \cdot 10^{-28}$  см<sup>2</sup>) середньозваженого експериментального перерізу реакції  $^9\text{Be}(\gamma, n)^8\text{Be}$  для монохроматичних  $\gamma$ -квантів з  $E_\gamma \geq 1,7$  МеВ, які супроводжують розпад  $^{66}\text{Ga}$ . Основна похибка (20 %) пов'язана з систематичною похибкою визначення ефективності реєстрації нейтронного лічильника.

Проводиться аналіз та обговорення отриманих результатів.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОМЕРНЫХ ОТНОШЕНИЙ $^{97\text{m,g}}\text{Nb}$ ПРИ ФОТОДЕЛЕНИИ $^{235}\text{U}$ И $^{238}\text{U}$

**В. А. Желтоножский<sup>1</sup>, А. Н. Саврасов<sup>1</sup>, Е. Н. Солодовник<sup>2</sup>,  
В. А. Плюйко<sup>2</sup>, А. Н. Горбаченко<sup>2</sup>, О. И. Давидовская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

<sup>2</sup> *Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев*

Измерены изомерные отношения  $\sigma_{(9/2)}/\sigma_{(1/2)}$  для  $^{97\text{m,g}}\text{Nb}$  при фотоделении  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  тормозными гамма-квантами с граничными энергиями 10,5, 12 и 18 МэВ. При энергиях 10,5 и 12 МэВ деление происходит только по каналу

( $\gamma$ , f), а при энергии 18 МэВ каналы фотоделения ( $\gamma$ , f) + ( $\gamma$ , nf) + ( $\gamma$ , 2nf).

Измерения выполнялись активационным методом посредством определения соотношения активностей ядер  $^{97}\text{Zr}$  ( $T_{1/2} = 16,9$  ч),  $^{97\text{m}}\text{Nb}$  ( $T_{1/2} = 52,7$  с) и  $^{97\text{g}}\text{Nb}$  ( $T_{1/2} = 72$  мин). Спектры фотоделения записывались с интервалом 1 мин. Для анализа использовались экспозиции близкие к соответствующим периодам полураспада.

В результате проведенных измерений, впервые получены величины изомерных отношений для  $^{97}\text{Nb}$ :  $\sigma_{(9/2)}/\sigma_{(1/2)} = 3,4 \pm 0,4$  для  $^{235}\text{U}$ ,  $\sigma_{(9/2)}/\sigma_{(1/2)} = 0,9 \pm 0,2$  и  $4,0 \pm 0,4$   $^{238}\text{U}$  для энергий 12 и 18 МэВ соответственно. Проводится обсуждение полученных данных.

## **РАСЧЕТ МЕТОДОМ МОНТЕ КАРЛО ОГИБАЮЩЕЙ ПУЧКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ, УСКОРЯЕМЫХ НА ТАНДЕМ-ГЕНЕРАТОРЕ ЭГП-10К**

**Г. Г. Заикин**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Для оценки условий ускорения тяжелых ионов N+5 в высоковольтной трубке тандем-генератора ЭГП-10К были проведены расчеты траекторий с использованием специально разработанной программы [1]. Однако оставался неясным вопрос о связи числа частиц в огибающей пучка с параметром крайней траектории: углом вылета частицы из обдирочной фольги. Расчеты формы контура сечения пучка на выходе трубки позволили с хорошей точностью считать, что сечение пучка в трубке с наклонными полями представляет собой круг. Таким образом, огибающую пучка в ускорительной трубке с наклонными полями можно рассматривать как результат модуляции в направлении наклонных полей огибающей пучка для трубки с продольным ускоряющим полем.

С использованием метода Монте Карло были выполнены расчеты относительного числа частиц в огибающей для трубки с продольным ускоряющим полем в зависимости от угла вылета крайней частицы  $\theta$ . Использовалась техника уменьшения дисперсии [2]. Расчеты показывают, что огибающая пучка с крайней траекторией  $2\theta_0$  содержит 96,1 % всех частиц, вылетающих из фольги радиусом 4мм, где  $\theta_0$  - среднеквадратичный угол многократного рассеяния частиц в фольге.

Можно считать, что критерием огибающей пучка в данном случае является величина  $2\theta_0$  для угла крайней траектории пучка.

Расчеты крайних траекторий ионов  $H^+$ , образующихся в результате развала молекулярного иона  $NH_2$  на углеродной фольге, показывают, что ионы попадают на электроды уже на расстоянии 1/3 длины ускоряющей тру-

бки, считая от ее входа. Это может быть причиной нестабильности при проводке пучка. Предлагается замкнуть один ускоряющий промежуток в начале высоковольтной ускоряющей трубки. Таким способом можно обеспечить неограниченное электродами прохождение пучков через трубку.

1. *Заикин Г.Г.* Ускорение тяжелых ионов на тандем-генераторе ЭГП-10К // Тези доп. XXII щорічної наукової конференції Ін-ту ядерних досл. (26 - 30 січня 2015 р.) - К., 2015. - С. 43.
2. *Beam G.B., Wielopolski L., Gardner R.P., Verghese K.* Monte Carlo calculation of efficiencies of right-circular cylindrical NaI detectors for arbitrarily located point sources // Nucl. Instr. and Meth. - 1978. - Vol. 154. - P. 501 - 508.

## **РОЗРЯДКА $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ ІЗОМЕРА, СТИМУЛЮВАНА НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНИМИ ГАММА-КВАНТАМИ, ПІДТВЕРДЖУЄТЬСЯ – ЩО ДАЛІ?**

**В. І. Киришук**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Практично відразу після винаходу мазерів і лазерів, з'явилися пропозиції щодо створення лазера в гамма діапазоні (тобто гразера), але до цього часу гразери все ще лишуються фантастикою. Наші останні експериментальні результати доводять - ключовий крок, який стосується ефективного вивільнення енергії (тригерінгу) ядерних ізомерів, що в принципі може забезпечити лазерне випромінювання в гамма діапазоні, все таки зроблено.

Результати перших двох наших експериментів з тригерінгу  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  ізомера були представлені на НРАЕ-2012 і опубліковані в нашому журналі в працях конференції [1, 2]. В обох експериментах було зафіксовано стимульований розпад  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  ізомера на рівні 2 - 3 %, при цьому значимість ефекту була на рівні 3,5 та 4,3  $\sigma$ , відповідно. Результати нашого третього експерименту не були опубліковані, але було надійно підтверджено тригерінг  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  ізомера, а значимість ефекту сягала 7,9  $\sigma$ .

Останній наш експеримент – спроба отримати максимум можливого, як з нашої установки, яка дає змогу опромінювати мішень електронами з енергією 30 кеВ, так і з наявних ізомерних мішеней [3]. В результаті було зафіксовано підсилення інтенсивностей всіх найсильніших  $\gamma$ -ліній в розпаді  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  ізомера, які знаходяться в каскаді – в середньому на  $1,55 \pm 0,12$  % (тобто це 13  $\sigma$ ). Також проглядається залежність величини ефекту від струму електронів. В якості базових ліній ми використали  $\gamma_{122}$  та  $\gamma_{136}$  кеВ піки зовнішнього джерела  $^{57}\text{Co}$ , для яких ніякого підсилення звичайно не могло бути і це було надійно зареєстровано. Таким чином, ні незначне уширення піків, ні невелике зміщення калібровки під час опромінення не може імітувати тригерінг  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  ізомера. І хоча температурні ефекти, відповідно до наших оцінок,

виходили несуттєвими, тим не менш ми провели додаткові експерименти, щоб впевнитись в тому абсолютно. При збільшенні відстані мішень - детектор в 2 та 3 рази, реєструємий тригерінг дійсно лишався незмінним.

Для випадку, коли за тригерінг  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  ізомера відповідає NEET при іонізації  $L_3(\text{Hf})$  - оболонки, ми зробили якісну оцінку перерізу такого процесу і він виявився на рівні 25 б. В той же час, верхня межа на такий переріз, яка дається в статтях з негативним ефектом, становить 4,4 б. Таким чином, ніякого величезного дисонансу або розходження на багато порядків очевидно нема.

Механізм тригерінгу  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  ізомера поки що до кінця не зрозумілий. В межах декількох  $\sigma$  зафіксоване підсилення інтенсивностей всіх каскадних переходів збігається і це не дає змоги не тільки побудувати, але й щось стверджувати про схему стимульованого розпаду  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  ізомера. Цілком можливо, що за виключенням одного або декількох низькоенергетичних переходів схема стимульованого розпаду повністю збігається зі схемою спонтанного розпаду  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  ізомера. На жаль, такі низько енергетичні піки не можуть бути зареєстровані в наших експериментах. Можливо саме тому ніяких нових  $\gamma$ -пиків, які відсутні при спонтанному розпаді  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  ізомера, не було виявлено в спектрах під час опромінення.

Наступні кроки з дослідження тригерінгу  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  ізомера будуть детально обговорені.

1. Kirischuk V.I., Strilchuk N.V. // Proc. of the 4th Int. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy" (Kyiv, 3 - 7 Sept. 2012). - Kyiv, 2013. - P. 396.
2. Dovbnya A.M., Kandybey S.S., Kirischuk V.I. et al. // Proc. of the 4th Int. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy" (Kyiv, 3 - 7 Sept. 2012). - Kyiv, 2013. - P. 378.
3. Kirischuk V.I., Ageev V.A., Dovbnya A.M. et al. // Phys. Lett. B. - 2015. - Vol. 750. - P. 89.

## ПОИСК СОЛНЕЧНЫХ АКСИОНОВ РЕЗОНАНСНО-ЯДЕРНЫМ МЕТОДОМ

В. В. Кобычев

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Аксион – гипотетическая псевдоскалярная массивная нейтральная частица, возникающая как следствие в одном из теоретически привлекательных вариантов решения для проблемы сохранения СР-чётности в КХД. Задача поиска аксионов является весьма актуальной, поскольку, кроме решения «сильной СР-проблемы», аксион оказывается среди лучших претендентов на роль частиц, составляющих холодную (т. е. нерелятивистскую) тёмную материю, которая, в соответствии с современной стандартной космологической

моделью, хорошо подтверждаемой наблюдениями, составляет около 23% всей материи во Вселенной. Если аксионы существуют, Солнце может быть интенсивным источником этих частиц. В частности, адронные аксионы (описываемые моделью с высокой константой связи аксиона с нуклонами) могут излучаться при магнитных переходах в некоторых ядрах с низколежащими уровнями ( $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{83}\text{Kr}$  и др.), возбуждаемыми тепловым движением в центре Солнца, а также в ядрах – промежуточных продуктах термоядерного цикла ( $^7\text{Li}$ ). Излучаемые моноэнергетические аксионы могут резонансно возбуждать такие же ядра в лаборатории, что позволяет обнаруживать эти процессы по гамма-квантам и конверсионным электронам, возникающим при распаде возбуждённых уровней в мишени. В этом состоит резонансно-ядерный метод поиска солнечных адронных аксионов.

Практически во всех экспериментах, проведенных с 1995 г., когда был предложен резонансно-ядерный метод, использовались либо мишени с малым количеством ядер (порядка грамма и меньше по массе), либо детекторы с низкой эффективностью (несколько процентов). В настоящее время в Баксанской нейтринной обсерватории проводится эксперимент с низкофоновой пропорциональной камерой, заполненной криптоном-83 в качестве мишени и рабочего газа. Большая масса резонансной мишени (101 г) и высокая эффективность регистрации позволили существенно улучшить ограничение на массу адронных аксионов ( $m_a < 100$  эВ).

## **АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ УСТАНОВКОЮ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ РАДІОІЗОТОПІВ НА ЦИКЛОТРОНІ У-240**

**О. М. Ковальов, О. О. Гаврилов, О. В. Дубінін, А. І. Устинов,  
А. П. Войтер, Л. В. Михайлов, А. І. Піскарьов**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Розроблена автоматизована система управління установкою для одержання радіонуклідів на циклотроні У-240 шляхом опромінення внутрішнім пучком мішені, що обертається. Система забезпечує повну автоматизацію циклу завантаження в циклотрон мішені, її опромінення і вивантаження. В процесі опромінення мішені здійснюється оперативний контроль і управління основними технологічними параметрами (позиціонування мішені, струм пучка, вакуум, проток води тощо).

Функціонально система має дві частини: релейну і програмно-електронну.

Релейна частина забезпечує безпосереднє управління електромеханічними пристроями та здійснює блокування заборонених послідовностей команд управління, які можуть привести до руйнації мішені та виникнення небезпечних наслідків для циклотрона. В системі передбачено крім автоматичного також повнофункціональний ручний режим роботи, необхідний для відпрацювання елементів технології та проведення ремонтних і налагоджувальних

робіт безпосередньо в залі прискорювача.

Програмно-електронна частина здійснює дистанційне управління (з розміщення пультової циклотрона) установкою в технологічному режимі напруження радіонуклідів. Вона реалізована на двох комп'ютерах, промислового I-8831 (Companu ICP DAS) та PC I386 під керуванням ОС UNIX. Консольна програма має інтерактивний інтерфейс у вигляді динамічної аплікації, що набагато спрощує роботу оператора.

Конструктивно система виглядає як дві шафи з пультом ручного керування, які розташовані безпосередньо біля установки в циклотронній залі, та комп'ютер оператора у приміщенні пультової циклотрона. Зв'язок між вузлами забезпечує локальна цифрова мережа циклотрона У-240.

### **ДИЗАЙН МІКРОСТРІПОВОГО МЕТАЛЕВОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПОЛОЖЕННЯ ТА ПРОФІЛЮ ПУЧКА НА ПРИСКОРЮВАЧІ PHIL (LAL, ORSAY)**

**О. С. Ковальчук<sup>1</sup>, С. Я. Барсуک<sup>2</sup>, П'єр Луїс Андре Леперк<sup>2</sup>, В. М. Міліція<sup>1</sup>,  
В. М. Пугач<sup>1</sup>, Д. І. Сторожик<sup>1</sup>, А. Фаус-Гольф<sup>2</sup>, О. А. Федорович<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Лабораторія лінійного прискорювача IN2P3, CNRS, Орсе, Франція*

Відділом фізики високих енергій сумісно з відділом фізики плазмових технологій ІЯД НАН України створено технологію виготовлення надтонких мікро-стріпових металевих детекторів (ММД) [1]. Ці детектори спроможні реєструвати потоки іонізуючого випромінювання у широкому діапазоні енергій та інтенсивності.

Особливостями ММД є їхня прозорість (товщина сенсору ~1 мкм) для потоків радіації, висока радіаційна стійкість (понад 100 МГр), висока просторова роздільна здатність (до 2 мкм), низька робоча напруга (до 20 В), унікальна технологія виробництва, комерційно доступна зчитувальна електроніка.

У рамках співпраці по проекту Міжнародної асоційованої лабораторії (LIA IDEATE) заплановано випробування мікροстріпових металевих детекторів для діагностики пучків електронів на прискорювачі PHIL (LAL, Орсе, Франція) [2]. Основні параметри прискорювача: енергія електронів у діапазоні 2 - 5 МеВ, частота - 5 Гц, заряд (на один банч) - від  $50 \cdot 10^{-15}$  Кл до  $2 \cdot 10^{-9}$  Кл. Для попередніх тестів у 2016 р.і, розроблено дизайн двох окремих детекторних систем для визначення положення пучка та для вимірювання профілю пучка. В одній системі буде встановлено 16-секторний металевий сенсор, який дає змогу з високою точністю визначати положення пучків заряджених частинок та синхротронного випромінювання. Високочутливі рядові інтегратори дають змогу вимірювати надзвичайно малі потоки частинок (від кількох фемто-ампер). Вимірювання профілю пучка буде здійснюватись другою детекторною системою на базі 128-стріпового металевого сенсо-



ра з кроком стріпів 30 мкм та системи збору та обробки даних XDAS (Sens-tech, Великобританія).

Робота виконується в рамках діяльності Лабораторії LIA IDEATE та за грантовою підтримкою Проекту ЦО-4-1/2015 НАН України.

1. *Pugatch V.M. et al.* Plasma technologies for manufacturing micro-strip metal detectors for ionizing radiation // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics". - 2007. - Vol. 13, No. 1. - P. 173 - 175.
2. *PHIL: a new test facility for LAL* <http://cerncourier.com/cws/article/cern/35436>

## **ДВУХКАМЕРНЫЙ ИСТОЧНИК ЛЕГКИХ ИОНОВ ЦИКЛОТРОНА У-240**

**А. И. Колосов, Л. В. Михайлов**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Для производства радиоактивных изотопов на внутреннем пучке циклотрона У-240 разработан двухкамерный радиальный источник легких ионов, позволяющий получать ток до 150 мкА внутреннего пучка протонов на радиусе вывода циклотрона без снижения скважности радиоимпульсов ускоряющего напряжения. Источник ионов обладает повышенной газовой экономичностью и приемлемым ресурсом непрерывной работы катода.

## **ЭНЕРГИИ И ИНТЕНСИВНОСТИ γ-ПЕРЕХОДОВ В РАСПАДЕ <sup>137</sup>Cs**

**В. Т Купряшкин**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Схема распада <sup>137</sup>Cs довольно проста. Считалось, что бета-распад в основном (94,7 %), идет на метастабильный уровень 661,6 кэВ <sup>137</sup>Ba, 11/2<sup>-</sup> с периодом полураспада T<sub>1/2</sub> = 2,6 мин, который далее разряжается γ-переходом М4 или конверсионным электроном на уровень 3/2<sup>-</sup> основного состояния <sup>137</sup>Ba, а оставшаяся часть β-распада (5,3 %) идет прямо на уровень основного состояния <sup>137</sup>Ba. Однако проведенные исследования схемы уровней <sup>137</sup>Ba в реакциях с различными заряженными частицами, с тепловыми и быстрыми нейтронами показали, что ниже уровня 661,6 кэВ <sup>137</sup>Ba существует еще одно состояние 1/2<sup>+</sup> и оно первое возбужденное состояние. Что касается энергии этого состояния, то ее значение в разных работах существенно различалась друг от друга и это было трудно объяснить плохим разрешением используемых детекторов или ошибками в калибровке по энергии. В работе [1] это значение составляло 279,2 кэВ, в затем было – 281 кэВ, в [2] – 283,39 кэВ. Интенсивности перехода с первого возбужденного состояния в основное со-

стояние также разнились друг от друга. Возникали вопросы о существовании перехода  $\gamma 378$  кэВ ( $661,6$  кэВ,  $11/2^- \rightarrow 283,5$  кэВ,  $1/2^+$ ) и его интенсивности.

С целью проверки данных распада  $^{137}\text{Cs}$  проведены измерения  $\gamma$ -спектра с использованием детектора высокого разрешения с подавлением комптоновского фона. Для измерений использовалась установка, разработанная в отделе структуры ядра ИЯИ НАН Украины. В работе использовался HPGe-детектор из сверхчистого германия с разрешением 1,8 кэВ на  $\gamma$ -линии 1332 кэВ  $^{60}\text{Co}$  и источник  $^{137}\text{Cs}$  из набора стандартных источников ОСГИ с активностью 67 кБк. Было проведено два измерения  $\gamma$ -спектра  $^{137}\text{Cs}$ , время измерений составляло  $t_1 = 3,108587 \cdot 10^6$  с  $\approx 36$  сут и  $t_2 = 2,500253 \cdot 10^6$  с  $\approx 28,9$  сут. Установлено, что переход  $\gamma 279$  кэВ, обнаруженный в работе [1], в нашей работе, не наблюдался и его следует считать ошибочным. Энергия перехода в нашей работе  $\gamma 283,4(1)$  кэВ хорошо согласуется с данными предыдущих работ и значением 283,50(10), приведенными в последней компиляции данных [3]. Наше значение интенсивности перехода  $\gamma 283,4$  кэВ  $I_\gamma = 67(20) \cdot 10^{-7}$  ниже, чем полученное в предыдущей работе по исследованию распада  $^{137}\text{Cs}$  [4].

Переход  $\gamma 377,9$  кэВ,  $I_\gamma = 1,12(9) \cdot 10^{-7}$ , обнаруженный недавно на более совершенной установке нового поколения [5], в нашей работе, так же как и в других работах, не наблюдался, а были сделаны только оценки его интенсивности. Наши оценки его интенсивности  $< 6 \cdot 10^{-7}$  лучше, чем в других ранее выполненных работах и косвенно подтверждают его малую интенсивность. Однако энергия перехода, приведенная в работе [5], отличается на 260 эВ от данных нашей и других работ и требует проверки.

1. Kerek A., Kovnacki J. // Nucl. Phys. - 1973. - Vol. A206. - P. 245 - 272.
2. Bondarenko V.A., Kuvaga I.L. et al. // Nucl. Phys. - 1995. - Vol. A582, P. 1 - 22.
3. Browne E., Tuli J.K. // Nucl. Data Sheets for A = 137 - 2007. - Vol. 108. - P. 2173 - 2318.
4. Сергеев В.О., Валиев Ф.Ф. // Изв. РАН. - 2007. - Т. 71, № 6. - С. 854 - 858.
5. Morgan K., McCutchan E.A. et al. // Phys. Rev. - 2014. - Vol. C90. - P. 041303(R).

## ПРЕЦИЗИЙНІ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ГАММА-ПРОМЕНІВ ІЗ РОЗПАДУ $^{122}\text{Sb}$

**А. П. Лашко, Т. М. Лашко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

На  $\gamma$ -спектрометрі, який складався з двох горизонтальних коаксіальних детекторів із надчистого германію (GEM-40195 та GMX-30190 з роздільною здатністю 1,73 кеВ і 1,89 кеВ на лінії  $\gamma 1332$   $^{60}\text{Co}$  відповідно) та багатоканаль-

ного буфера 919 SPECTRUM MASTER фірми ORTEC були порівняні різниці енергії між 4 парами  $\gamma$ -променів:  $\gamma 603(^{124}\text{Sb}) - \gamma 564(^{122}\text{Sb})$ ,  $\gamma 723(^{124}\text{Sb}) - \gamma 693(^{122}\text{Sb})$ ,  $\gamma 1141(^{122}\text{Sb}) - \gamma 1045(^{124}\text{Sb})$  та  $\gamma 1326(^{124}\text{Sb}) - \gamma 1257(^{122}\text{Sb})$ . Один  $\gamma$  перехід із кожної пари збуджується при розпаді  $^{122}\text{Sb}$ , а другий, енергія якого відома з високою точністю, супроводжує розпад  $^{124}\text{Sb}$ .

Джерела випромінювання  $^{122}\text{Sb}$  та  $^{124}\text{Sb}$  ( $T_{1/2} = 60,20$  діб) отримані в реакції ( $n, \gamma$ ) на дослідницькому реакторі ІЯД НАН України при опроміненні тепловими нейтронами сурми, збагаченої ізотопом  $^{123}\text{Sb}$ .  $^{124}\text{Sb}$  має значну кількість  $\gamma$ -ліній в високоенергетичній частині спектра, тому виявилася найбільш зручною як джерело випромінювання реперних  $\gamma$ -квантів.

Щоб звести до мінімуму можливі систематичні похибки, вимірювання проводили серіями при різних коефіцієнтах підсилення. Спочатку визначили різниці енергій  $\gamma$ -ліній як зважене середнє за результатами всіх вимірювань, а потім і значення енергії  $\gamma$ -переходів. Результати вимірювань добре узгоджуються між собою.

Ці дані були використані нами для розрахунку енергії перших збуджених станів та розряджаючих їхніх  $\gamma$ -переходів в  $^{122}\text{Sn}$  та  $^{122}\text{Te}$ . Результати розрахунків спільно зі зваженими середніми значеннями з компіляції [1] представлено в таблиці.

| Наші дані         |                    | Компіляція [1]   |                    |
|-------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Енергія, еВ       |                    | Енергія, еВ      |                    |
| рівнів            | $\gamma$ -променів | рівнів           | $\gamma$ -променів |
| $^{122}\text{Sn}$ |                    |                  |                    |
| $1140542 \pm 31$  | $1140537 \pm 31$   | $1140510 \pm 30$ | $1140520 \pm 40$   |
| $^{122}\text{Te}$ |                    |                  |                    |
| $564108 \pm 6$    | $564107 \pm 6$     | $564094 \pm 16$  | $564130 \pm 21$    |
| $1256879 \pm 7$   | $692769 \pm 10$    | $1256953 \pm 16$ | $692770 \pm 30$    |
|                   | $1256872 \pm 7$    |                  | $1256890 \pm 20$   |

Отримані значення енергії  $\gamma$ -променів, що супроводжують розпад  $^{122}\text{Sb}$ , добре узгоджуються з даними інших експериментальних робіт та перевершують їх за точністю. Відзначимо також, що енергія найбільш інтенсивного переходу  $\gamma 1257$  кеВ визначена нами з похибкою меншою за  $1 \cdot 10^{-5}$ . Така точність відповідає вимогам щодо ліній, які можуть бути використані як енергетичні стандарти для ядерної спектроскопії. Зважаючи на це, ми рекомендуємо використовувати її в якості енергетичної нормалі четвертого порядку.

1. Tamura T. // Nucl. Data Sheets. - 2007. - Vol. 108. - P. 455.

## КРЕМНІЄВА ТРЕКІНГОВА СИСТЕМА ЕКСПЕРИМЕНТУ СВМ

**А. О. Лиманець<sup>1,2</sup>, О. Ю. Охріменко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

<sup>2</sup> Інститут важких іонів (GSI), Дармштадт, Німеччина

Експеримент СВМ (Compressed Baryonic Matter, стиснута баріонна речовина) досліджуватиме фазову діаграму сильно взаємодіючої речовини в ядроядерних зіткненнях при найвищих баріонних густинах, використовуючи ряд рідкісних сигналів і масових спостережуваних величин. Її ключовий компонент-в Кремнієва Трекінгова Система (КТС) – буде реконструювати до 1000 траєкторій заряджених частинок на зіткнення ядер золота при інтенсивності взаємодії до 10 МГц і вимірювати їхні імпульси. Конструкція системи передбачає застосування сенсорів із високою гранулярністю, що відповідає вкрай неоднорідному розподілу треків, і швидкої електроніки із самозапуском на ряду з ситемою збору і накопичення вільного потоку даних із відбором подій у режимі реального часу. Необхідна роздільна здатність по імпульсу  $\Delta p/p \sim 1,5\%$  обумовлює необхідність надлегкого дизайну з кількістю речовини 0,3 - 1 %  $X_0$  на станцію.

Вісім трекінгових станцій КТС, що працюють в апертурі дипольного магніту з полем 1 Т будуть охоплювати полярні кути між 2,5 і 25°. Станції із загальною площею сенсорів 4,2 м<sup>2</sup> будуть складатися із близько 1000 детекторних модулів на основі двосторонніх кремнієвих мікстріпових сенсорів, ультра-тонких зчитувальних кабелів і зчитувальної електроніки, встановлених на легких підтримуючих структурах із вуглецевого волокна.

На доповіді буде представлено статус виробництва компонентів системи, зокрема сенсорів, зчитувальних кабелів і зчитувальних чіпів. Також будуть представлені результати збірки компонентів детекторного модуля у повнорозмірний прототип та інженерна розробка механічної структури КТС.

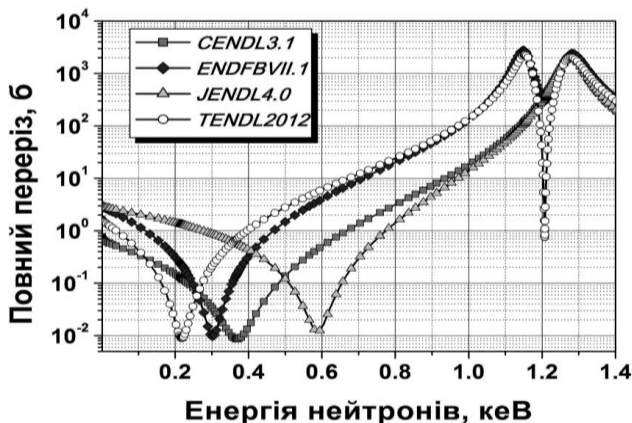
## МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРОТИРІЧ В БОЯД

**В. А. Лібман, О. О. Грицай**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Новітні версії бібліотек оцінених ядерних даних (БОЯД) мають протиріччя, що стосуються даних про нейтронні перерізи. Щоб вирішити ці протиріччя, ми пропонуємо метод експериментальної перевірки. Цей метод заснований на використанні модифікованих фільтрованих пучків нейтронів і подальшому вимірюванні пропускання зразка відповідного ядра. Суть методу, який пропонується, полягає у застосуванні фільтрованих пучків нейтронів з такими спектральними лініями, щоб виміряні, усереднені по цих

спектрах, нейтронні перерізи з достатньою достовірністю давали відповідь з якою з БОЯД вони узгоджуються.



Повний нейтронний переріз  $^{142}\text{Ce}$  згідно різних БОЯД

Метод демонструється на прикладі церію, який, згідно з останніми версіями чотирьох БОЯД, має істотно різні значення повного нейтронного перерізу.

## АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ФОТОНЕЙТРОННИХ ПЕРЕРІЗІВ, ОДЕРЖАНИХ НА КВАЗІМОНОХРОМАТИЧНИХ ГАММА-ПУЧКАХ

**В. М. Мазур, З. М. Біган, П. С. Деречкей,  
І. Ю. Сейка, В. В. Гриньов, С. І. Вучкан**

*Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород*

Уточнення величин перерізів парціальних фотонейтронних реакцій виміряних для одних і тих же ядер на пучках квазімонохроматичних гамма-квантів, одержаних шляхом анігіляції позитронів на льоту в лабораторіях Сакле і Лівермора [1], виявило помітні систематичні розходження. В основному всі перерізи ( $\gamma, n$ ) реакції були дещо більші в даних Сакле, але перерізи реакції ( $\gamma, 2n$ ) – більші в Ліверморі. Розходження в результатах було пояснено різницею в сортуванні по нейтронній множинності, тобто різницею в рахуванні  $1n$  і  $2n$  подій [2, 3].

У даній роботі зроблена спроба прямим спектроскопічним методом, який виключає вклад каналу ( $\gamma, 2n$ ) в канал ( $\gamma, n$ ), перевірити можливу інтерференцію вкладів реакцій ( $\gamma, 2n$ ) і ( $\gamma, n$ ) на ядрі  $^{142}\text{Ce}$  в даних Сакле [4]. В якості монітора використовувалася реакція  $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139}\text{Ce}$ . Ядра  $^{140}\text{Ce}$  і  $^{142}\text{Ce}$  дуже зручні для цих цілей. По-перше, ідентифікація реакцій ( $\gamma, n$ ) для цих ядер відбувається по близьким лініям 165 кеВ і 140 кеВ, що мінімізує похибку зв'язану із визначен-

ням фотоефективності детектора. По-друге, пороги ( $\gamma$ , 2n) реакцій для розглянутих ядер суттєво відрізняються (на 4 МеВ), що дає можливість прецензійного визначення вкладу 2n подій у вихід ( $\gamma$ , n) реакцій. Для підвищення точності аналізу порівнювалися відносні виходи, а не перерізи.

Нами проведено вимірювання відношень виходів  $f_{\text{exp}} = Y(\text{Ce}^{140})/Y(\text{Ce}^{142})$  реакцій  $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139}\text{Ce}$  і  $^{142}\text{Ce}(\gamma, n)^{141}\text{Ce}$  в області максимальних енергій гальмівного спектру  $E_{\gamma\text{max}} = 9 \div 18$  МеВ. Робота виконувалася на пучку гальмівних гамма-квантів мікротрону М-30 ІЕФ НАН України. Для порівняння ми перерахували перерізи одержані в Сакле у виходи  $Y$  для ядер  $^{140}\text{Ce}$  і  $^{142}\text{Ce}$  і знайшли їхні відношення  $f_{\text{Sacl}} = Y(\text{Ce}^{140})/Y(\text{Ce}^{142})$ . Порівняння кривих  $f_{\text{exp}}(E_{\gamma\text{max}})$  і  $f_{\text{Sacl}}(E_{\gamma\text{max}})$  показує, що вони з високою точністю повторюють одна одну. Проте спостерігається деякий зсув кривої  $f_{\text{Sacl}}$  від наших даних в сторону нижчих енергій. При врахуванні такого зсуву наші результати одержані спектроскопічними методами і результати Сакле збігаються з точністю до похибок. Це вказує на те, що можливо похибка в результатах Сакле зв'язана з реєстрацією 1n і 2n подій знаходиться на рівні  $\sim 2\%$ .

1. *Dietrich S.S. et al. // J. Atom. Data and Nucl. Data Tables. - 1988. - Vol. 38. - P. 199.*
2. *Wolynec E. et al. // Phys. Rev. C. - 1984. - Vol. 29. - P. 1137.*
3. *Varlamov V.V. et al. // Eur. Phys. J. - 2014. - Vol. 50. - P. 114.*
4. *Lepretre A. et al. // Nucl. Phys. A. - 1976. - Vol. 258. - P. 350.*

## РЕАКЦІЯ $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{B})^{12}\text{C}$ ТА ПОТЕНЦІАЛ ВЗАЄМОДІЇ ЯДЕР $^{12}\text{B} + ^{12}\text{C}$

**С. Ю. Межевич<sup>1</sup>, А. Т. Рудчик<sup>1</sup>, К. Русек<sup>2</sup>, Є. І. Коший<sup>3</sup>,  
А. А. Рудчик<sup>1</sup>, С. Б. Сакута<sup>4</sup>, А. Щурек<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

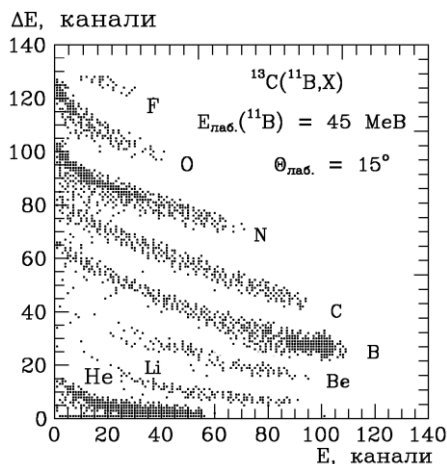
<sup>2</sup> *Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща*

<sup>3</sup> *Харківський національний університет, Харків*

<sup>4</sup> *Національний дослідний центр «Курчатовський інститут», Москва, Росія*

<sup>5</sup> *Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща*

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{B})^{12}\text{C}$  для основних та збуджених станів ядер  $^{12}\text{B}$  і  $^{12}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{11}\text{B}) = 45$  МеВ. Кутові розподіли продуктів реакцій  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, X)$  вимірювались на Варшавському циклотроні U-200P з використанням  $\Delta E$ - $E$ -методики з іонізаційною камерою як  $\Delta E$ -детектором. Робочим газом у камері служив аргон, втрати енергії продуктів реакції в якому були такими ж, як у кремнієвому детекторі товщиною 15 мкм. На рисунку показано типовий двовимірний  $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, X)$ . Видно, що методика забезпечувала добре розділення продуктів реакцій за зарядами  $Z = 3 - 8$ .



Типовий  $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, X)$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{11}\text{B}) = 45 \text{ MeV}$ .

Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) для одно- і двоступінчастих передач нуклонів і кластерів. У МЗКР-розрахунках для вхідного каналу реакції використано потенціал взаємодії ядер  $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$ , отриманий з МЗКР-аналізу даних пружного розсіяння іонів  $^{11}\text{B}$  ядрами  $^{13}\text{C}$ , та спектроскопічні амплітуди переданих у реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{B})^{12}\text{C}$  нуклонів і кластерів, обчислені в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки.

Визначено параметри оптичного потенціалу взаємодії ядер  $^{12}\text{B} + ^{12}\text{C}$  методом підгонки МЗКР-перерізів до експериментальних даних реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{B})^{12}\text{C}$ . Досліджено механізми одно- й двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у цій реакції. Встановлено, що основну роль у реакції відіграє передача нейтронів. Досліджено ізотонічні відмінності параметрів потенціалів взаємодії  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  та  $^{12}\text{B} + ^{12}\text{C}$ .

## **КОРЕЛЬОВАНІСТЬ РУХУ ЕЛЕКТРОНА «СТРУСУ» ІЗ ПОЗИТРОНОМ ПРИ $\beta^+$ -РОЗПАДІ**

**М. Ф. Митрохович**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Сильна корельованість напрямку руху супутньої частинки (електрон Оже, електрон «струсу») із основною частинкою ( $\beta^+$ -електрон, електрон внутрішньої конверсії) в напрямку вперед [1] підказує на механізм виникнення їх, як зумовлений струмовими компонентами взаємодії заряджених часток. Якщо

це так, то повинна спостерігатись сильна корельованість електрона «струсу» із позитроном при  $\beta^+$ -розпаді, оскільки і компонента струму позитрона і поперечна компонента струму електрона «струсу», відповідальна за рух вперед [1], одночасно протилежні. Для підтвердження (або спростування) такого механізму, що важливо для вирішення як ядерної так і загально-фізичної задачі про рух заряджених частинок, була досліджена просторова корельованість імпульсів руху  $\Upsilon = (4\pi/P)dp/d\Omega$  електронів «струсу» при  $\beta^+$ -розпаді в напрямку руху позитрона.

Вимірювання проведені для розпаду  $^{152}\text{Eu}$  на установці для вимірювання подвійних, потрійних та почетверних збігів  $\gamma$ -квантів з бета-частинками, електронами та низько енергетичними електронами, включаючи  $e_0$  електрони вторинної електронної емісії. Оскільки інтенсивність  $\beta^+$ -копнента розпаду  $^{152}\text{Eu}$  всього 0,026 %, то корельованість електрона «струсу» із позитроном вимірювалась відносно корельованості електрона «струсу» із  $\beta^-$ -частинкою на основі проведення вимірювань  $\gamma$ ,  $\gamma\beta$ ,  $\gamma(e_0 + \beta^-)$ ,  $\gamma\beta e_0^-$  та  $\gamma\beta\gamma_{511}$  і  $\gamma\beta\gamma_{511}e_0^-$  спектрів.

Встановлено, що супутня частинка (електрон «струсу») сильно скорельована по напрямку вперед із основною частинкою ( $\beta^+$ -частинка), причому корельованість  $\Upsilon$  руху із позитроном в 1,6 разів перевищує корельованість руху із  $\beta^-$ -частинкою і становить  $\sim 5$  при вимірюваннях у розпаді  $^{152}\text{Eu}$ . Це узгоджується із запропонований в [1] якісним механізмом сильної корельованості руху супутньої частинки із основною в процесах радіоактивного розпаду і внутрішньої конверсії, як зумовленим струмовими компонентами взаємодії часток в кінцевому стані.

1. *Митрохович Н.Ф.* Корреляционные свойства движения сопутствующей частицы относительно движения основной частицы в процессах радиоактивного распада и внутренней конверсии //Ядерна фізика та енергетика. - 2014. - Т. 15, № 2 - С. 126 - 131.

## **МОЖЛИВОСТІ ОДЕРЖАННЯ РАДІОНУКЛІДІВ НА ВНУТРІШНЬОМУ ПУЧКУ ЦИКЛОТРОНА У-240, ЯКИЙ ШИРОКО ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ В ЯДЕРНІЙ МЕДИЦИНІ**

**Л. В. Михайлов**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Ізохронний циклотрон У-240 є базовою установкою Інституту ядерних досліджень і єдиним на Україні багатоцільовим прискорювачем в області середніх енергій, який перекидає необхідний діапазон енергій для здійснення практично всіх циклотронних радіонуклідів, які широко застосовуються в ядерній медицині. Розглядається можливість напрацювання їх на базі розроблених мішеней.



# ОПРОМІНЮВАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ НАПРАЦЮВАННЯ ІЗОТОПІВ СТРОНЦІУ-82 НА ІЗОХРОННОМУ ЦИКЛОТРОНІ У-240

**Л. В. Михайлов**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Проведений експериментальний аналіз параметрів розробленої опромінювальної установки та конструкції мішені, що обертається, дав змогу створити установку, що забезпечує тривале опромінення мішені RbCl внутрішнім пучком протонів з інтенсивністю 150 мкА та енергією не менше 70 МеВ. Створена установка дає змогу напрацьовувати ізотопи стронцію-82 на внутрішньому пучку протонів ізохронного циклотрона У-240.

## **512-КАНАЛЬНА ДЕТЕКТОРНА СИСТЕМА РЕЄСТРАЦІЇ ТА ОБРОБКИ РЕНТГЕНОГРАМ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ШВИДКОПЛИННИХ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛАХ ПРИ НАГРІВАННІ ТА ОХОЛОДЖЕННІ**

**В. М. Міліція<sup>1</sup>, В. В. Бурдін<sup>2</sup>, О. С. Ковальчук<sup>1</sup>,  
О. Ю. Охріменко<sup>1</sup>, В. М. Пугач<sup>1</sup>, Д. І. Сторожик<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут проблем матеріалознавства НАН України, Київ*

Завершена розробка позиційно чутливої мікро-детекторної системи реєстрації рентгенівського випромінювання, як елементу експериментальних методик для дослідження швидкоплинної динаміки фазових переходів в металах та їхніх сполуках при нагріванні/охолодженні або стискуванні/розтягу.

Створена система дає змогу знімати до 1000 рентгенограм за секунду в кутовому розподілі до 60°. Для цього у фокальній площині встановлено 4 детекторних модулів (2 групи по 2 модулі, кожен по 128 каналів), які перекривають по 30 мм в області малих та великих кутів та реєструють потоки розсіяних рентгенівських променів з енергією від 8 кеВ при експозиціях в діапазоні 1 - 10 мс. Кожен з детекторних модулів включає мікростріпові кремнієві сенсори (по 128 стріпів із кроком 120 мкм), сполучені мікрокабелями (виробництво ІМП НАНУ) через спеціально розроблені плати-адаптери зі 128 каналними мікро-підсилювачами системи накопичення та відображення даних X-DAS (Sens-Tech, UK). Система XDAS має модульну архітектуру, що дає змогу вільно оперувати розміщенням детекторних модулів у просторі.

Мікростріпові детекторні модулі протестовано на лазерному стенді ІЯД НАН України та на установці рентгенографування швидкоплинних процесів ІПМ НАН України. Виміряна позиційна чутливість становить величину біля 40 мкм. Виконано характеристичні дослідження нової детекторної системи на еталонному зразку заліза. Порівняльний аналіз показав узгодженість виміря-

них характеристик дифракційних піків з даними детекторної системи на основі мікропіксельного детектора Тімеріх (розробка ЦЕРН).

Новостворена детекторна система, маючи значну перевагу по собівартості, не поступається подібним системам по просторовій та часовій роздільній здатності і має значну перевагу по діапазону чутливості у просторі. Чутлива область системи може бути легко розширена на весь діапазон фокальної площини рентген установки завдяки модульній конструкції.

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБОРУ ЗАРЯДУ В МІКРОСТРІПОВИХ СЕНСОРАХ ДЛЯ КРЕМНІЄВОЇ ТРЕКОВОЇ СИСТЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТУ СВМ**

**Є. Л. Момот<sup>1,2</sup>, Й. Хойзер<sup>3</sup>, М. А. Теклішин<sup>1,3</sup>, В. М. Пугач<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Франкфуртський університет ім. Гете, Франкфурт на Майні, Німеччина*

<sup>3</sup> *Інститут важких іонів, Дармштадт, Німеччина*

Кремнієва Трекова Система (КТС) [1] експерименту СВМ (Compressed Baryonic Matter, GSI, Darmstadt) розробляється для реконструкції треків і визначення імпульсу заряджених частинок, що утворюються в ядро-ядерних зіткненнях при релятивістських енергіях. В КТС будуть використовувати двосторонні мікростріпові кремнієві сенсори, встановлені на легких конструкціях з вуглецевого волокна в дипольному магніті. Стріпи на р-стороні нахилені на  $7,5^\circ$  по відношенню до п-сторони для вимірювання X-, Y- координат хітів від заряджених частинок та зменшення кількості хітів-привидів. У лабораторних умовах для тестування сенсорів застосовувалась зчитуюча система Alibava [2], що використовує front-end зчитувальний чіп, розроблений спеціально для кремнієвих мікростріпових сенсорів експерименту LHCb. Дана система дає змогу характеризувати властивості як опромінених так і неопромінених сенсорів.

Дослідження по збору заряду виконані з джерелом бета-частинок  $^{90}\text{Sr}$ , щоб імітувати в сенсорах відгук, еквівалентний мінімально іонізуючим (релятивістським) зарядженим частинкам. З цією метою для тригерування системи Alibava використовували сигнали із швидкого сцинтиляційного детектора, які відповідали найбільш енергетичним бета-частинкам джерела (понад 2 MeV). Виміряний в такий спосіб спектр сигналів відгуку мікростріпового сенсора фітувався Ландау-Гаусівською згорткою, а найбільш ймовірна величина відгуку інтерпретується як зібраний заряд. В роботі порівнюються дослідження різних типів з'єднання між стріпами детекторів та стріпами зчитувальної електроніки, що може дати змогу скоротити кількість електроніки у зовнішній апертурі детектора.

1. *CBM collaboration*. Technical Design report for the CBM Silicon Tracking System // GSI Report 2013-4.
2. <https://www.alibavasytems.com>

# ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЬФА-ВИПРОМІНЮВАННЯ «СТАРИХ» РАДІОЕКОЛОГІЧНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ДЖЕРЕЛ ІЗОТОПІВ ЯДЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

**А. П. Осипенко, М. М. Осипенко**

*Ужгородський національний університет, Ужгород*

Альфа-розпад є унікальним видом радіоактивності, в якому із початкового ядра  $X$  з масовим числом  $A$  та зарядом  $Z$  випромінюється позитивно заряджена частинка та утворюється нове ядро  $Y$ .

Основні характеристики альфа-розпаду важких ядер, потік та енергія альфа-частинок викликають практичний інтерес при розробці методів контролю основних подільних матеріалів ядерного палива – урану, плутонію тощо з урахуванням їхніх ізотопних складів.

У даній роботі розглядається можливість використання напівпровідникового поверхнево-бар'єрного детектора альфа-частинок типу ДВКс-100. Площа робочої цього детектора рівна  $100\text{мм}^2$ . Електричні імпульси, що утворюються у напівпровідниковому детекторі при взаємодії альфа-частинок з кремнієвим кристалом детектора поступають з виходу детектора через підсилювач сигналів на вхід амплітудного аналізатора імпульсів – АИ-1024. можливість 100 % реєстрації альфа-частинок в умовах перебільшеного фону фотонів і бета-частинок створює значні переваги для досягнення високої чутливості по визначенню малих кількостей альфа-радіонуклідів та відповідно їх активності. Вимірювання альфа-активності та енергетичного спектру альфа-частинок досліджуваних джерел ізотопів ядерних матеріалів (Pu-238, Pu-239, Ra-226 та триплету U-233, Pu-239, Pu-238) проводилися при установці їх у систему фіксації, при якій геометричні параметри джерел і детектора були ідентичні. При цьому віддаль від поверхні детектора до джерела була у межах 1 - 1,5 мм. Підбір управління альфа-спектрометричної установки забезпечував реєстрацію піків повного поглинання відповідних мінімальній та максимальній енергії альфа-частинок на границях вибраного діапазону реєструючої «доріжки» аналізатора імпульсів АИ-1024. У результаті проведених досліджень визначена ефективність реєстрації альфа-частинок становила 10 %. Визначення енергії альфа-частинок досліджуваних джерел проводилась з використанням калібровочної кривої по U-234, Cm-244 і Cf-252.

Використовуючи одержану калібровочну криву альфа-спектрометра, проведено вимірювання активності вищевказаних джерел. Оцінені величини енергій по літературним даним та порівняні з їх експериментальним дослідженням показали збіг для Pu-238, Pu-239 та Ra-226. Для інших ізотопів буде проведена корекція вимірювань.

Враховуючи проведені вимірювання, слід звернути увагу на удосконалення альфа-спектрометра при послідовних експериментальних досліджень.

Результати такого контролю необхідні для підтвердження якості технології, задоволення вимогам радіаційної безпеки і екології.

1. *Фролов В.В.* Ядерно-физические методы контроля делящихся веществ. - М.: Энергоиздат, 1989. - 184 с.
2. *Кутлахмедов Ю.О. та ін.* Основи радіоекології: навч. посіб. - К.: Вища школа, 2003. - 319 с.

## **ВИМІРЮВАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ ПОПЕРЕЧНИХ ПЕРЕРІЗІВ УТВОРЕННЯ $V^0$ -ЧАСТИНОК У ПРОТОН-ЯДЕРНИХ ЗІТКНЕННЯХ ПРИ ЕНЕРГІЇ 5 TeV**

**О. Ю. Охріменко<sup>1</sup>, В. М. Пугач<sup>1</sup>, І. О. Костюк<sup>1,2</sup>, Є. Петренко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

Представлено результати експерименту LHCb (ЦЕРН) по вимірюванню диференційних поперечних перерізів утворення  $V^0$  частинок ( $K_S^0$  мезонів та  $\Lambda$  баріонів) у протон-ядерних та ядерно-протонних (ядра  $^{208}\text{Pb}$ ) зіткненнях при енергії у системі центра мас  $\sqrt{s} = 5$  TeV. Данні перерізи ( $d\sigma/dydp_T$ , де  $y$  - рапідіті,  $p_T$  - переданий поперечний імпульс  $V^0$  частинки) наведені для різних діапазонів поперечного імпульсу ( $p_T$ ) (в межах від 0,15 до 2,5 GeV/c) та рапідіті ( $y$ ) (від 2,0 до 4,0 та від -5,0 до -3,0 для протон-ядерних та ядерно-протонних зіткнень відповідно). З метою зменшення систематичних похибок обраховано також відношення поперечних перерізів утворення анти- $\Lambda$  баріонів до  $K_S^0$  мезонів ( $\sigma(\text{анти-}\Lambda)/\sigma(K_S^0)$ ) та до  $\Lambda$  баріонів ( $\sigma(\text{анти-}\Lambda)/\sigma(\Lambda)$ ) залежно від поперечного імпульсу для вищезгаданих зіткнень. Також буде обчислено фактор ядерного впливу  $R_{pA}$ , який визначається як:

$$R_{pA}(y, p_T, \sqrt{s_{NN}}) \equiv \frac{1}{A} \frac{d\sigma_{pA}(y, p_T, \sqrt{s_{NN}})/dydp_T}{d\sigma_{pp}(y, p_T, \sqrt{s_{NN}})/dydp_T}$$

де індекс  $pA$  позначає протон-ядерні зіткнення, а  $pp$  - протон-протонні,  $A$  - кількість нуклонів у ядрі.

## **СИСТЕМА РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ЕКСПЕРИМЕНТУ LHCb В УМОВАХ ПРОТОН-ПРОТОННИХ ЗІТКНЕНЬ З ЕНЕРГІЄЮ 13 TeV**

**О. Ю. Охріменко<sup>1</sup>, В. М. Пугач<sup>1</sup>, Ф. Алессіо<sup>2</sup>, Р. Якобссон<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Європейський центр ядерних досліджень, Женева, Швейцарія*

Представлені результати роботи Системи радіаційного моніторингу (SRM) для Внутрішнього Трекера (VT) експерименту LHCb у 2015 р. У цьому році Великий Адронний Колайдер розпочав роботу у новому режимі:

енергія протон-протонних зіткнень у системі центра мас 13 TeV, частота зіткнень 25 нс, миттєва світимість  $2 - 4 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-1}\text{с}^{-1}$ , кількість нееластичних протон-протонних взаємодій на один перетин банчів 1,1. Представлені результати по вимірюванню розподілу потоків заряджених частинок, а також, по оцінці поглинутої дози та зміні струмів витоку через кремнієві сенсори ВТ. Значення вищезгаданих величин для сенсорів біля йонопроводу сягають  $7 \cdot 10^{11} \text{ МІЧ/см}^2$ , 15 кГц та 60 мкА відповідно.

Наведено результати по вимірюванню інтегральної світимості експерименту ЛНСб за допомогою СРМ. Одержані результати в рамках похибок узгоджуються з вимірюваннями інших детекторних систем.

## **РОЗСІЯННЯ ПРОТОНІВ ЯДРАМИ $^{11}\text{B}$ ТА РЕАКЦІЯ $^{11}\text{B}(\text{p}, \alpha)^8\text{Be}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ 3,75 MeV**

**Ю. М. Павленко<sup>1</sup>, О. К. Горпинич<sup>1</sup>, А. В. Степанюк<sup>1</sup>,  
Ю. Я. Карлишев<sup>1</sup>, Т. О. Корзина<sup>1</sup>, Д. В. Касперович<sup>1</sup>, Л. Л. Дулгер<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

На тандем-генераторі ЕГП-10К ІЯД НАН України отримано кутові розподіли розсіяння протонів ядрами  $^{11}\text{B}$  та реакції  $^{11}\text{B}(\text{p}, \alpha)^8\text{Be}$  при енергії протонів 3,75 MeV, що відповідає можливому утворенню складеного ядра  $^{12}\text{C}^*(19,40 \text{ MeV}, 2^-)$ . Аналіз даних за методом зв'язаних каналів реакцій показав, що основним механізмом реакції  $^{11}\text{B}(\text{p}, \alpha)^8\text{Be}$  є прямиий процес підхоплення тритонного кластера ядра мішені. Визначено також параметри оптичного потенціалу взаємодії ядер  $^{11}\text{B} + \text{p}$  та  $\alpha$ -частинки з нестабільним ядром  $^8\text{Be}$ .

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЦИНТИЛЯЦІЙНОГО АЛЬФА, ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА**

**О. М. Парлаг, В. О. Мартишичкіц, В. І. Жаба,  
А. П. Осипенко, І. Ю. Сийка**

*Ужгородський національний університет, Ужгород*

Побудовано сцинтиляційний альфа та гамма-спектрометр на базі стандартного блоку детектування БДБС3-1eM з модифікованою електронною частиною. Робота проводилась для перевірки нових умов використання спектрометра у навчальних лабораторіях. Для реєстрації гамма-квантів використано кристал NaI(Tl), розміром  $63 \times 63 \text{ мм}$  з колодцем. Для реєстрації альфа частинок використано кристал CsI(Tl), розміром  $63 \times 0,35 \text{ мм}$ . Сигнали з блоку детектування на підсилювались та формувались підсилювачем БУС2-95. У якості аналізатора використано комп'ютер з встановленою програмою Thermano Multi Channel Analyser[1] у якій використовується АЦП звукової

карти комп'ютера.

Для перевірки альфа-спектрометричної частини використано взірцеві джерела ОСИАІ, а для гамма-спектрометра джерело радію розміщене у спеціальний контейнер. Визначено енергетичну роздільну здатність спектрометра [2] для альфа частинок та гамма-квантів.

Одержані дані порівнювалися з паспортними даними блоку детектування БДБС3-1еМ та даними вимірювань, коли детектор підключався до аналізатора типу АІ-1024.

1. *Gamma Spectrometry Gamma Radionuclides and X Ray Spectrometry* // <http://www.theremino.com>, 2015.
2. *Ядерная физика в интернете* // МГУ, <http://nuclphys.sinp.msu.ru>, 2015.

## **ВИВЧЕННЯ НЕЗВ'ЯЗАНИХ РІВНІВ ЯДЕР З РЕАКЦІЙ ЧОТИРИЧАСТИНКОВОГО РОЗВАЛУ**

**О. М. Поворозник, О. К Горпинич**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Чотиричастинковий розвальний процес передбачає, що таку систему слід розглядати як прояв чотирьох тіл у кінцевому стані ядерної реакції безвідносно до того, чи ці чотири тіла є окремими нуклонами, чи один або навіть всі є класстерами чи атомними ядрами. Експериментальне вивчення таких процесів відкриває широкі можливості для дослідження механізмів утворення та розпаду незв'язаних рівнів, яким властива як дво-, так і тричастинкова структура.

Як відомо, для кінематично повного опису ядерної реакції, результатом якої є поява в кінцевому стані  $N$  частинок, необхідно визначити  $3N-4$  змінних, тому для кінематично повного опису чотирьох частинок у кінцевому стані ядерної реакції необхідно визначити вісім їхніх кінематичних характеристик. Якщо вивчати утворення чотирьох частинок у вихідному стані, реєструючи на збігу лише дві вихідні частинки, то досягти кінематичної повноти неможливо, але тим не менше можна отримати детальну інформацію про механізми протікання 4-частинкової реакції та характеристики дво- (три-) частинкових незв'язаних станів ядер.

Скориставшись можливостями, які надає дослідження такого експериментального феномену та опираючись на кінематичні особливостей реєстрації на збігу двох із чотирьох продуктів у кінцевому стані реакції  $T(p, 12)34$ , отримані в роботі [1], ми провели ряд експериментів по дослідженню незв'язаних рівнів легких ядер в 4-частинкових реакціях. А саме, нами було досліджено спектри збудження  ${}^6\text{He}$  ( $0 < E_{36} < 20$  MeV) та  ${}^8\text{Be}$  ( $0 < E_{36} < 12$  MeV) шляхом кінематично неповного експериментального вивчення  ${}^3\text{H}(\alpha, p\alpha)nn$  (при  $E\alpha = 27,2$  MeV [2] та  $E\alpha = 67,2$  MeV [3]) та  ${}^{12}\text{C}(\alpha, \alpha\alpha)\alpha\alpha$  (при  $E\alpha = 27,2$  MeV [4]). У спектрі збудження  ${}^6\text{He}$  виявлено і визначено енергетичні параметри 20 збу-

джених незв'язаних рівнів, що розпадаються через випромінювання  $\alpha$ -частинки і двох нейтронів. Отриманий спектр збудження ядра  ${}^8\text{Be}$  було параметризовано, як прояв 4-незв'язаних станів. Крім того, аналіз експериментальних даних з 4-частинкової  ${}^{12}\text{C}(\alpha, \alpha\alpha)\alpha\alpha$  реакції, свідчить про можливість використання останньої для вивчення 3а кластерного збудженого стану  ${}^{12}\text{C}$  з енергією збудження 10,3 МеВ.

Важливо підкреслити, що продовження такого роду експериментів є на часі, оскільки, наші знання про будову спектрів збудження найлегших ядер досить контрверсійні.

1. *Furic M., Forster H.H.* // Nucl. Instrum. Meth. - 1972. - Vol. 98. - P. 301.
2. *Povoroznyk O.M., Mandaglio G., Gorpinich O.K. et al.* // Modern Physics Letters. A. - 2014. - Vol. 29, No. 19. - P. 1450105.
3. *Povoroznyk O.M., Vasilevsky V.S.* // Ukr. J. Phys. - 2015. - Vol. 60, No. 3. - P. 201 - 216.
4. *Поворозник О.М., Горпинич О.К., Стружко Б.Г.* // Укр. фіз. журн. - 2003. - Т. 48, № 5. - С. 407 - 410.

## ПОШУК ПОДВІЙНОГО БЕТА-РОЗПАДУ ${}^{116}\text{Cd}$ (ЕКСПЕРИМЕНТ AURORA)

**О. Г. Поліщук<sup>1</sup>, А. С. Барабаш<sup>2</sup>, П. Беллі<sup>3,4</sup>, Р. Бернабей<sup>3,4</sup>,  
Я. В. Васильєв<sup>5</sup>, Ф. А. Даневич<sup>1</sup>, С. Д'Анжело<sup>3,4</sup>, А. Інчікітті<sup>6</sup>,  
Ф. Каппелла<sup>7</sup>, В. Караччіоло<sup>7</sup>, В. В. Кобичев<sup>1</sup>, С. І. Коновалов<sup>2</sup>,  
М. Лаубенштейн<sup>7</sup>, В. М. Мокіна<sup>1,6</sup>, Д. В. Пода<sup>1,8</sup>, В. І. Третяк<sup>1,6</sup>,  
В. І. Уматов<sup>2</sup>, Д. М. Черняк<sup>1</sup>, Р. Черуллі<sup>7</sup>, В. М. Шлегель<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

<sup>2</sup> Інститут теоретичної та експериментальної фізики, Москва, Росія

<sup>3</sup> НІЯФ, відділення у Римі «Тор Вергата», Рим, Італія

<sup>4</sup> Римський університет «Тор Вергата», Рим, Італія

<sup>5</sup> Інститут неорганічної хімії ім. А.В. Ніколаєва, Новосибірськ, Росія

<sup>6</sup> НІЯФ, відділення у Римі, Рим, Італія

<sup>7</sup> Національна лабораторія Гран-Сассо, Ассерджі, Італія

<sup>8</sup> Центр ядерної фізики та матеріалознавства, Орсе, Франція

Ізотоп  ${}^{116}\text{Cd}$  є одним з найбільш перспективних для дослідження подвійного бета-розпаду ( $2\beta$ ) з огляду на сприятливі теоретичні передбачення та можливість експериментальних досліджень (висока енергія розпаду  $Q_{2\beta} = 2813,5(13)$  кеВ, відносно висока ізотопна розповсюдженість 7,49%). Експеримент Aurora з метою дослідження  $2\beta$ -розпаду ядер  ${}^{116}\text{Cd}$  ведеться у підземній лабораторії Гран-Сассо (Італія) за допомогою низькофонових сцинтиляційних кристалів вольфрамату кадмію ізотопно збагачених  ${}^{116}\text{Cd}$  ( ${}^{116}\text{CdWO}_4$ , 82%, із загальною масою 1162 г) у низькофоновій установці DAMA/R&D. Енергетична роздільна здатність детектора (ширина піку на половині висоти)

становить близько 5 %, фон детектора в інтервалі енергій 2,7 - 2,9 MeV становить 0,1 відліків/(рік · кг · кеВ). Період напіврозпаду ядра  $^{116}\text{Cd}$  відносно двонейтринної моди  $2\beta$ -розпаду виміряно з найвищою на сьогодні точністю:  $T_{1/2} = [2,62 \pm 0,02(\text{stat.}) \pm 0,14(\text{syst.})] \cdot 10^{19}$  років. На період напіврозпаду ядра  $^{116}\text{Cd}$  відносно безнейтринного  $2\beta$ -розпаду на основний стан  $^{116}\text{Sn}$  встановлено нове обмеження  $T_{1/2} \geq 1,9 \cdot 10^{23}$  років (з довірчою ймовірністю 90 %), що відповідає ефективній масі нейтрино Майорани  $\langle m_\nu \rangle < (1,3 - 1,7)$  еВ. Нові обмеження (на рівні чутливості  $T_{1/2} \geq 10^{20} - 10^{23}$  років) отримані для  $2\beta$ -розпаду  $^{116}\text{Cd}$  на збуджені рівні  $^{116}\text{Sn}$  та на безнейтринний  $2\beta$ -розпад з випромінюванням майоронів. Триває набір та аналіз даних.

## **ЕНЕРГЕТИЧНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ДИФРАКЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ ПРУЖНОГО РОЗСІЯННЯ ВАЖКИХ ІОНІВ НА ЛЕГКИХ ЯДРАХ**

**О. А. Понкратенко, Вал. М. Пірнак, А. А. Рудчик, А. Т. Рудчик, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Проаналізовано дифракційну область наявних експериментальних диференціальних перерізів пружного розсіяння важких іонів на легких ядрах для 24 пар взаємодіючих ядер з  $4 \leq A \leq 20$  в широкому інтервалі енергій налітаючих іонів від 1 до 100 MeВ/нуклон. Положення дифракційних максимумів і мінімумів у координатах переданого імпульсу (у діапазоні від 0 до 3 - 4 фм<sup>-1</sup>) в залежності від енергії налітаючого іона демонструють плавну поведінку при енергіях вище 2 ÷ 4 MeВ/нуклон. Ці енергетичні залежності положень максимумів (мінімумів) вдається успішно параметризувати простими функціями для всіх пар ядер [1].

Досліджено також для 8 з цих пар взаємодіючих ядер еволюцію зі зміною енергії значень перерізів пружного розсіяння в перших 4 - 6 дифракційних максимумах. Для кожної з цих пар ядер знайдено параметризацію залежності цих значень перерізів від енергії налітаючого іона та переданого імпульсу.

Виконано аналіз експериментальних даних пружного у рамках оптичної моделі. Побудовано енергетично-залежний оптичний потенціал взаємодії для даних систем у повному діапазоні енергій [2]. Отриманий потенціал задовільно описує всі наявні експериментальні дані, чітко відображає характерні риси поведінки перерізів.

1. Понкратенко О.А., Пірнак Вал. М., Рудчик А.А. та ін. Аналіз залежності положень дифракційних екстремумів пружного розсіяння важких іонів на легких ядрах від енергії налітаючого іона // Ядерна фізика та енергетика - 2015. - Т. 16, № 3. - С. 223.
2. Понкратенко О.А., Рудчик А.А., Рудчик А.Т. та ін. Глобальні потенціали взаємодії для дифракційного розсіяння  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  та  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  у широкому діапазоні енергій // Ядерна фізика та енергетика. - 2014. - Т. 15, № 3.



# МЕТРОЛОГІЯ МАКРОВЕЛИЧИН У ЯДЕРНІЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРІЇ РЯДІВ $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{235}\text{U}$

**О. М. Поц, М. В. Стець, В. Т Маслюк**

*Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород*

Одним із напрямків розширення можливостей типової прикладної ядерної гамма-спектрометрії є розробка методів, що використовують безеталонний якісний та кількісний аналіз речовини та сумішей різними методами спектроскопії (інші назви – розрахункові стандарти, математичні еталони). У деяких інших предметних областях спектроскопії їх вже використовують [1].

Пропонований нами метод має відношення до вимірювання макровеличин. Макровеличина, як організована множина індивідуальних фізичних однорідних величин, є функцією від одних і тих самих змінних. Такою макровеличиною, може бути експериментальний нуклідний спектр активностей рядів  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ . Способи вимірювання макровеличин повинні задовольняти вимогам метрології, зокрема повинні мати стандарти порівняння.

Якщо стандарту масою  $m_{Ci}$  і-го нукліда відповідає активність  $A_{Ci}$ , а в зразку  $X$  масою  $m_{Xi}$  нукліда відповідає активність  $A_{Xi}$ , тоді між цими величинами можна записати залежність:

$$A_{Xi} = K_{Ci} \cdot m_{Xi},$$

$K_{Ci} = A_{Ci} / m_{Ci}$  – коефіцієнт, який виконує метрологічну функцію. Дана залежність буде правильною, якщо стандарт і зразок будуть взаємно-однорідними по своїм властивостям, тобто практично ідентичними.

Розглядаємо метод вимірювання, який суттєво використовує розрахункові стандарти. Розгляд здійснено в рамках методу стандартних множин. Стандартна множина нуклідів ряду – це впорядкована сукупність нуклідів, які пов'язані радіоактивним розпадом / утворенням та їх активності визначаються розв'язками системи диференціальних рівнянь Батемана. Цей розв'язок є функцією єдиного для всіх нуклідів власного часу  $T_e$ . Розрахувавши значення активностей нуклідів для достатньо великої кількості точок власного часу  $T_e$ , отримуємо впорядковані часові залежності стандартних (модельних) нуклідних спектрів активностей для всіх нуклідів – членів рядів  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ . Вони можуть бути представлені графічно, або програмно. Отримана таблиця стандартів розглядається як розрахунковий стандарт.

1. Грибов Л.А., Баранов В.И., Эляшберг М.Е. Безэталонный молекулярный спектральный анализ. Теоретические основы. - М.: Изд-во Эдиториал УРСС, 2002. - 317 с.

# КРАСИВА ТА ЧАРІВНА ФІЗИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ LHCb

**В. М. Пугач**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

На відзнаку 20 річчя Колаборації LHCb (ЦЕРН) в оглядовій доповіді представлені визначні фізичні результати, одержані на Великому Адронному Колайдері із використанням форвардного спектрометра LHCb [1], у спорудженні та експлуатації якого всі ці роки беруть участь співробітники ІЯД НАН України. Успішно функціонують усі детекторні підсистеми, включаючи систему радіаційного моніторингу [2], створену за оригінальними фізико-технічними принципами та технологією, розробленими в ІЯД НАН України.

У 2015 р. вперше в історії науки досягнуто енергію протон-протонних зіткнень 13 TeV. Це відкриває можливість спостереження нових явищ та вимірювання характеристик теоретично передбачуваних кваркових процесів в новому енергетичному просторі.

Наводяться виміряні характеристики важких мезонів, до складу яких входять красиві (beauty) або чарівні (charm) кварки. Одержані результати (маса, час життя, частоти осциляцій частинка-анти-частинка, співвідношення гілок розпаду, тощо) є найбільш точними або одержані вперше в світі.

Вперше спостережено рідкісні моди розпаду B-мезонів різного складу на два мюони. Фракція таких розпадів, подвійно заборонених в рамках СМ, становить  $10^{-9}$  -  $10^{-10}$ .

Опубліковані в цьому році дані по спостереженню екзотичних пентакваркових структур, а також раніше не спостережуваних адронів дали змогу визначити їхні квантові характеристики.

Із аналізу даних часової еволюції розпадів нейтральних B-мезонів та їхніх анти-партнерів визначено характеристики порушення комбінованої CP-парності. Їхні величини узгоджуються із передбаченнями Стандартної Моделі (СМ). З огляду на той факт, що Стандартна Модель в її сучасному формулюванні не дає змоги пояснити незаперечний факт асиметричної розбудови Всесвіту, зроблено висновок про необхідність розвитку нових теорій та експериментальних методик, які були б чутливі до фізичних процесів за межами Стандартної Моделі [3].

Представлено перспективу фізичних досліджень експерименту LHCb у 2016 - 2017 рр. та його модернізацію у 2018 - 2019 рр.

1. *LHCb Collaboration*. The LHCb Detector at the LHC // J. of Instrumentation. - 2008. - Vol. 3. - P. S08005.
2. *Okhrimenko O.* RMS Performance in 2015. 78<sup>th</sup> LHCb Week. Dec. 7<sup>th</sup>, 2015, CERN, Geneva.
3. *Pugatch V. (on behalf of the LHCb Collaboration)*. Results from B Physics.

Proc. of the Int. Workshop “Prospects for Charged Higgs Discovery at Colliders Charged2014” (16 - 18 Sept. 2014. Uppsala University, Sweden). - LHCb-TALK-2014-308.

## **КОМБІНОВАНИЙ БАРЕЛЬНИЙ ТА ФОРВАРДНИЙ ТРЕКІНГ У MVD-ДЕТЕКТОРІ ЕКСПЕРИМЕНТУ PANDA**

**М. В. Пугач<sup>1,2,3</sup>, С. Горбунов<sup>2,3</sup>, І. Кисель<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Франкфуртський університет ім. Гете, Франкфурт на Майні, Німеччина*

<sup>3</sup> *Франкфуртський інститут перспективних досліджень,  
Франкфурт на Майні, Німеччина*

Мікровершинний детектор (MVD) експерименту PANDA (Anti-proton Annihilation at Darmstadt, GSI, Darmstadt) представляє собою комплексну детекторну установку, що складається з барельної (циліндричної) та форвардної частин. Подібна конструкція потребує особливого підходу для виконання процедури пошуку треків заряджених частинок, що були зареєстровані в детекторі. Для даного детектору розроблено трекінг на основі алгоритмів фільтру Калмана та кліткового автомату. Наразі трекінг працює в обох частинах детектору MVD незалежно один від одного. Кінцевою метою роботи за цим напрямком є створення комбінованого трекінгу, який би працював в обох частинах одночасово.

Особливість детекторного комплексу MVD в експерименті PANDA полягає в тому, що одна частина траєкторії зарядженої частинки може бути зареєстрована у форвардній частині, а інша - у барельній. Трекінг у такій системі є дуже специфічним, оскільки потребує двох різних моделей для опису вектору стану сегментів реконструйованого треку у математичному апараті алгоритму фільтра Калмана. Для подолання цієї специфіки необхідно розробити та застосувати математичний апарат матриць переходу від однієї моделі треку до іншої.

Після створення відповідних сегментів треку виконується робота алгоритму кліткового автомату над масивом побудованих сегментів, що зводиться до сортування їх, поєднання у трек-кандидати та відбір найкращих кандидатів за критерієм  $\chi^2$ -квадрат після фітування всього трек-кандидату фільтром Калмана.

У даній публікації описано алгоритм, статус та перспективи застосування подібного комбінованого трекінгу.

## ПРУЖНЕ ТА НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ІОНІВ $^{15}\text{N}$ ЯДРАМИ $^7\text{Li}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ 81 Мев У ПОРІВНЯННІ З РОЗСІЯННЯМ $^{14}\text{N} + ^7\text{Li}$

А. Т. Рудчик<sup>1</sup>, Л. М. Муравинець<sup>2</sup>, Є. І. Кошій<sup>3</sup>, Е. П'ясецькі<sup>4</sup>, К. Русек<sup>4</sup>,  
А. Трціньська<sup>4</sup>, Вал. М. Пірнак<sup>1</sup>, А. А. Рудчик<sup>1</sup>, О. А. Понкратенко<sup>1</sup>,  
В. А. Плюйко<sup>2</sup>, С. Б. Сакута<sup>5</sup>, А. Столяж<sup>4</sup>, І. Строск<sup>6</sup>, А. Щурек<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

<sup>2</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

<sup>3</sup> Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків

<sup>4</sup> Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

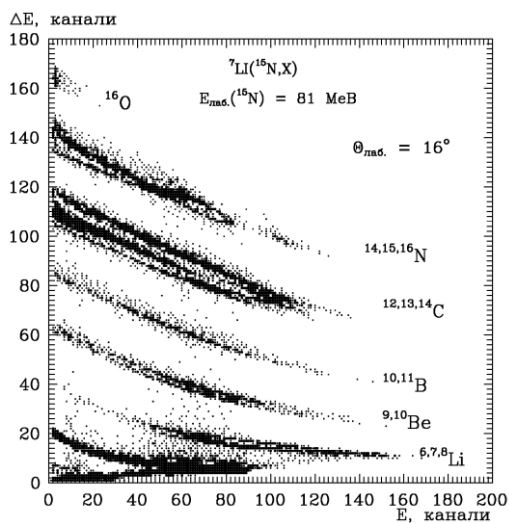
<sup>5</sup> Національний дослідний центр «Курчатовський інститут», Москва, Росія

<sup>6</sup> Національний інститут ядерних досліджень, Варшава, Польща

<sup>7</sup> Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^7\text{Li}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 81$  Мев. Експеримент проведено з використанм пучка іонів  $^{15}\text{N}$  Варшавського циклотрона У-200Р на експериментальній установці ICARE.

Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). Пружне та непружне розсіяння, процес реорієнтації спіна ядра  $^7\text{Li}$  в основному та збуджених станах, а також найбільш важливі реакції передач включались у схему зв'язку каналів.



Типовий  $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій  $^7\text{Li}(^{15}\text{N}, X)$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 81$  Мев.

Виявлено, що в пружно-му розсіянні іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^7\text{Li}$  на малі кути основну роль відіграє потенціальне розсіяння, а на великі кути – значну роль відіграє також процес реорієнтації спіна ядра  $^7\text{Li}$ . Внески реакцій передач у пружне розсіяння ядер  $^7\text{Li} + ^{15}\text{N}$  незначні. Непружне розсіяння ядер із збудженням низькоенергетичних дискретних станів ядер  $^7\text{Li}$  і  $^{15}\text{N}$  задовільно пояснюється МЗКР-розрахунками в рамках моделі колективної природи цих станів (ротаційні та вібраційні збудження).

Визначено параметри потенціалу взаємодії ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ , а також параметри їхньої деформації  $\delta_\lambda$ . При порівнянні кутових розподілів пружно розсіяних іонів  ${}^{15}\text{N}$  і  ${}^{14}\text{N}$  [1] ядрами  ${}^7\text{Li}$  та параметрів потенціалів взаємодії їх виявлено ізотопічні відмінності.

1. Rudchik A.T., Herashchenko O.V., Kemper K.W. et al. Elastic and inelastic scattering of  ${}^{14}\text{N}$  ions by  ${}^7\text{Li}$  at 80 MeV (c.m. 26.7 MeV) // Eur. Phys. J. A. - 2014. - Vol. 50. - P. 159.

## ПРОЦЕДУРЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ОДНОМЕРНЫХ ДАННЫХ ПРИ ПЕРЕВОДЕ ИХ С ОДНОЙ СЕТКИ АРГУМЕНТОВ НА ДРУГУЮ

**А. М. Соколов**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

При работе с несколькими наборами данных обычно требуется согласовывать сетки аргументов, на которых они получены. Для двух часто встречающихся для одномерных спектров ситуаций предложены процедуры преобразования данных при переводе их с одной сетки аргументов на другую. Первая связана с переводом оцененных спектрометрических данных, хранящихся на неравномерных сетках аргументов, на равномерную сетку аргументов. В дальнейшем такие данные можно сравнивать с измеренными на шкале каналов спектрами (рис. 1).

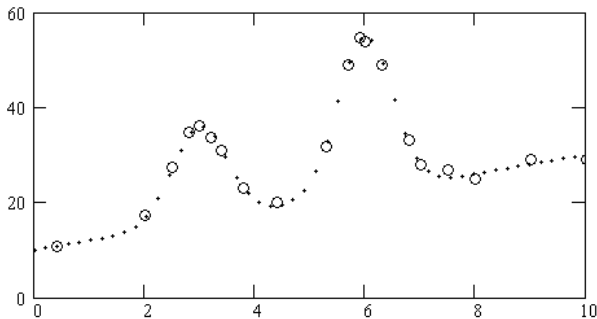


Рис. 1. Дискретные данные на неравномерной сетке (o) и результат их перевода на частую равномерную сетку.

Процедура реализует метод двух опор [1] и устойчива к пропускам в данных. Вторая задача состоит в переводе данных с равномерной сетки на другую равномерную сетку с проведением замены переменной и возникает при согласовании энергетических шкал спектров и приведении их к одной энергетической калибровке (рис. 2).

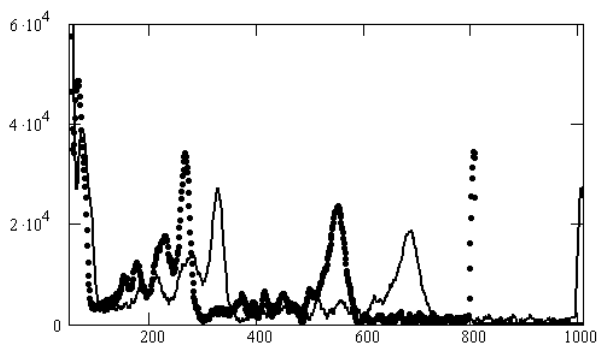


Рис. 2. Исходный спектр (точки)  
и спектр после замены переменной (сплошная линия).

Кроме преобразования самих значений данных при переходе к новой сетке аргументов оценивается изменение статистических характеристик данных.

1. Соколов А.М. Аппроксимация экспериментальных зависимостей по методу двух опор. - Киев, 1988. - 13 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ 88-36).

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВЗАЄМОДІЇ ІОНІВ  $^{18}\text{O}$  З ЯДРАМИ  
 $^7\text{Li}$  ТА  $^6\text{Li}$  ПРИ ЕНЕРГІЇ 114 Мев З ВРАХУВАННЯМ  
ПРУЖНОГО, НЕПРУЖНОГО РОЗСІЯННЯ  
ТА РЕАКЦІЙ ОДНОНУКЛОННИХ ПЕРЕДАЧ**

**Ю. М. Степаненко, С. Ю. Межевич, О. А. Понкратенко, А. А. Рудчик,  
А. Т. Рудчик, В. В. Улещенко, К. А. Черкас**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Виконано аналіз експериментальних даних пружного, непружного розсіювання та реакцій одноступінчастих передач при взаємодії іонів  $^{18}\text{O}$  з ядрами  $^7\text{Li}$  та  $^6\text{Li}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$  Мев в рамках методу зв'язаних каналів реакцій [1 - 5]. Розрахунки проводились в рамках єдиного підходу з включенням у схему зв'язку всіх вихідних каналів, що аналізуються одночасно. Збудження ядер у вихідних каналах описувались як в рамках колективної моделі, так і як одночастинкові збудження в рамках моделі оболонки. Досліджено

вплив зв'язку каналів реакції на потенціал взаємодії у вхідному каналі, що відображається в ослабленні уявної частини оптичного потенціалу. Також проведено порівняльний аналіз взаємодії ізотопів літію  ${}^7\text{Li}$  та  ${}^6\text{Li}$  з ядрами  ${}^{18}\text{O}$  з врахуванням досліджуваних ефектів зв'язку каналів реакції.

1. Rudchik A.A., Rudchik A.T., Kliczewski S. et al. // Nucl. Phys. A. - 2007. - Vol. 785. - P. 293.
2. Rudchik A.T., Kliczewski S., Chercas K.A. et al. // Nucl. Phys. A. - 2014. - Vol. 922. - P. 71.
3. Rudchik A.T., Stepanenko Yu.M., Kemper K.W. et al. // Nucl. Phys. A. - 2009. - Vol. 831. - P. 139.
4. Rudchik A.T., Stepanenko Yu.M., Kemper K.W. et al. - Phys. Rev. C. - 2011. - Vol. 83. - P. 024606.
5. Rudchik A. T., Chercas K. A., Kemper K. W. et al. // Nucl. Phys. A. - 2014. - Vol. 927. - P. 209.

## **ФОРМУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГ МІНІ-ПУЧКОВИХ СТРУКТУР ДЛЯ ПРОСТОРОВО ФРАКЦІОНОВАНОЇ РАДІАЦІЙНОЇ ТЕРАПІЇ**

**Д. І. Сторожик<sup>1</sup>, Є. Л. Момот<sup>1</sup>, О. С. Ковальчук<sup>1</sup>,  
О. Ю. Охріменко<sup>1</sup>, Й. Презадо<sup>2</sup>, В. М. Пугач<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

<sup>2</sup> Лабораторія обробки зображень і моделювання  
в нейробіології та онкології, Орсе, Франція

Використовуючи моделювання методом Монте-Карло, оцінено дизайн та ефективність коліматорів для цілей фракціонованої міні-пучкової адронної радіаційної терапії. Розрахунки здійснено для іонних пучків водню, вуглецю та кисню при енергіях, придатних для медичного застосування.

Для вимірювання розподілу інтенсивності заряджених частинок в багато пучкових структурах, сформованих щільними або матричними коліматорами, були випробувані мікропксельні металеві та гібридні детектори, використовуючи низько енергетичний протонний пучок тандем генератора ІЯД НАН України (Київ).

Отримані результати показали прийнятне функціонування розроблених коліматорів, а також металевих та гібридних мікропксельних детекторів для вимірювання та візуалізації в реальному часі розподілу інтенсивності протонів в міні-пучкових структурах. Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф69/53-2015.

**ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ  
КРЕМНІСВИХ МІКРОСТРІПОВИХ ДЕТЕКТОРІВ  
ТРЕКОВОЇ СИСТЕМИ МАЙБУТЬОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ CBM (FAIR)**

**М. А. Теклішин<sup>1,2</sup>, В. Добіщук<sup>3</sup>, Є. Л. Момот<sup>1,4</sup>, В. М. Пугач<sup>1</sup>, Й. Хойзер<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Комплекс для антипротонних та іонних досліджень (FAIR),*

*Дармштадт, Німеччина*

<sup>3</sup> *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

<sup>4</sup> *Франкфуртський університет ім. Гете, Франкфурт на Майні, Німеччина*

<sup>5</sup> *Інститут важких іонів (GSI), Дармштадт, Німеччина*

Для трекової системи майбутнього експерименту CBM (FAIR, Дармштадт) планується використовувати двосторонні мікростріпові кремнієві детектори 300 мкм завтовшки [1]. За допомогою різних методів, включаючи опромінення бета-джерелом, інфрачервоним лазером та пучком високоенергетичних протонів на прискорювачі, в об'ємі детектору генерується електричний заряд. Збір цього заряду, вивчення його перерозподілу між сусідніми стріпами та зчитувальною електронікою дає змогу дослідити ефективність роботи детектору, оцінити відношення сигналу до шуму, виміряти роздільну здатність та ефективність окремих компонентів трекової системи.

На даному етапі розробки установки основною метою є дослідження різних типів сенсорів від різних виробників, із двома різними способами з'єднання нахилених стріпів (за допомогою подвійної металізації або мікрокабеля), вивчення змін властивостей сенсорів після радіаційного опромінення.

Для вищезгаданих досліджень використовуються два типи зчитувальної електроніки, котрі базуються на мікрочіпах nXYTER [2] та Beetle [3].

1. *CBM collaboration*. Technical Design report for the CBM Silicon Tracking System. - GSI Report 2013-4.
2. *Brogna A.S. et al.* The n-XYTER Reference Manual. - GSI Public note 2009.
3. *Lochner S., Schmelling M.* The Beetle Reference Manual. - LHCb-2005-105.



**ПОШУК  $2\beta$  РОЗПАДУ  $^{106}\text{Cd}$   
ЗІ ЗБАГАЧЕНИМ КРИСТАЛІЧНИМ СЦИНТИЛЯТОРОМ  $^{106}\text{CdWO}_4$   
У РЕЖИМІ ЗБІГІВ З ЧОТИРМА  $\text{HPGe}$  ДЕТЕКТОРАМИ**

**В. І. Третяк<sup>1,2</sup>, П. Беллі<sup>3</sup>, Р. Бернабей<sup>3,4</sup>, В. Б. Бруданін<sup>5</sup>, Ф. А. Даневич<sup>1</sup>,  
С. Д'Анжело<sup>3,4</sup>, А. ді Марко<sup>4</sup>, А. Інчікітті<sup>2,6</sup>, Ф. Капелла<sup>7</sup>, В. Карачіолло<sup>7</sup>,  
М. Лаубенштейн<sup>7</sup>, В. М. Мокіна<sup>1</sup>, Д. В. Пода<sup>1,8</sup>, О. Г. Поліщук<sup>1,2</sup>,  
І. А. Тупіцина<sup>9</sup>, Д. М. Черняк<sup>1</sup>, Р. Черулли<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *НІЯФ, відділення у Римі «Ла Сапієнца», Рим, Італія*

<sup>3</sup> *НІЯФ, відділення у Римі «Тор Вергата», Рим, Італія*

<sup>4</sup> *Римський університет «Тор Вергата», Рим, Італія*

<sup>5</sup> *Об'єднаний інститут ядерних досліджень, Дубна, Росія*

<sup>6</sup> *Римський університет «Ла Сапієнца», Рим, Італія*

<sup>7</sup> *НІЯФ, Національна лабораторія Гран-Сассо, Ассерджі, Італія*

<sup>8</sup> *Центр ядерної фізики та матеріалознавства, Орсе, Франція*

<sup>9</sup> *Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України, Харків*

Радіоактивно-чистий кристалічний сцинтилятор з вольфрамату кадмію, збагачений  $^{106}\text{Cd}$  до 66 % ( $^{106}\text{CdWO}_4$ ), з масою 216 г був використаний для пошуку подвійних бета ( $2\beta$ ) процесів у  $^{106}\text{Cd}$  у режимі збігів з чотирма наднизькофоновими германієвими детекторами, розташованими в одному криостаті. Після 13085 годин вимірювань у підземній лабораторії Гран Сассо (Італія) були встановлені нові обмеження на періоди напіврозпадів для  $2\beta$  процесів у  $^{106}\text{Cd}$  на рівні  $T_{1/2} > 10^{20} - 10^{21}$  років, що в більшості є на сьогодні найбільш жорсткими із відомих. Зокрема, обмеження на період напіврозпаду для дво-нейтринного поглинання електрона з випроміненням позитрона  $T_{1/2}^{2\nu e\beta^+} > 1,1 \cdot 10^{21}$  років досягло рівня теоретичних передбачень. Із таким значенням  $T_{1/2}$ , обмеження на відповідний ефективний ядерний матричний елемент становить  $M_{\text{eff}}^{2\nu e\beta^+} < 1,1$ . Для резонансних безнейтринних подвійних електронних поглинань на збуджені стани 2718, 2741 та 2748 кеВ дочірнього ядра  $^{106}\text{Pd}$  встановлені обмеження на рівні  $T_{1/2} > 8,5 \cdot 10^{20} - 1,4 \cdot 10^{21}$  років.

## ПОШУК ДОВГОІСНУЮЧОГО НАДВАЖКОГО ЕЛЕМЕНТА ЕКА-ВОЛЬФРАМ З РАДІОАКТИВНО-ЧИСТИМ КРИСТАЛІЧНИМ СЦИНТИЛЯТОРОМ $ZnWO_4$

**В. І. Гретьяк<sup>1,2</sup>, П. Беллі<sup>3</sup>, Р. Бернабей<sup>3,4</sup>, Ф. А. Даневич<sup>1</sup>, А. Д'Анжело<sup>2</sup>,  
В. Ю. Денисов<sup>1</sup>, А. Інчікітті<sup>2</sup>, Ф. Капелла<sup>5</sup>, В. В. Кобичев<sup>1</sup>, Д. В. Пода<sup>1,6</sup>,  
О. Г. Поліщук<sup>1,2</sup>, Р. Черуллі<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

<sup>2</sup> НІЯФ, відділення у Римі «Ла Сапієнца», Рим, Італія

<sup>3</sup> НІЯФ, відділення у Римі «Тор Вергата», Рим, Італія

<sup>4</sup> Римський університет «Тор Вергата», Рим, Італія

<sup>5</sup> НІЯФ, Національна лабораторія Гран-Сассо, Ассерджі, Італія

<sup>6</sup> Центр ядерної фізики та матеріалознавства, Орсе, Франція

Дані експерименту, проведеного в підземній лабораторії Гран Сассо (Італія) з радіоактивно-чистим сцинтиляційним кристалічним детектором  $ZnWO_4$  (маса – 699 г) впродовж 2130 годин, були використані для пошуку можливої присутності надважкого елемента ека-W (сиборгій Sg,  $Z = 106$ ) у кристалі. Припускаючи, що в ланцюжку радіоактивних розпадів початкового ядра Sg одне з дочірніх ядер випромінює високоенергетичні  $\alpha$  частинки ( $Q_\alpha > 8$  MeV) та аналізуючи високоенергетичну частину виміряного спектру, було отримане обмеження на концентрацію ека-W в кристалі  $N(Sg)/N(W) < 5,5 \cdot 10^{-14}$  атом/атом (для періоду напіврозпаду Sg  $T_{1/2} = 10^9$  р.), що знаходиться на рівні обмежень, отриманих у нещодавніх експериментах з використанням альтернативних методик (мас-спектрометрія або пошук спонтанного поділу надважких ядер) [1].

1. *Belli P. et al. // Physica Scripta. - 2015. - Vol. 90. - P. 085301.*

## МОДЕЛЮВАННЯ КРІОГЕННИХ СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ БОЛОМЕТРІВ З КРИСТАЛАМИ $Zn^{100}MoO_4$ ДЛЯ ПОШУКУ $0\nu 2\beta$ РОЗПАДУ ЯДРА $^{100}Mo$ В УСТАНОВЦІ EDELWEISS

**Д. М. Черняк, В. В. Кобичев**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Безнейтринний подвійний ( $0\nu 2\beta$ ) бета-розпад є надзвичайно рідкісним гіпотетичним процесом, експериментальне спостереження якого дасть змогу встановити майоранівську природу нейтрино (частинка і античастинка співпадають), допоможуть визначити схему масових станів нейтрино, виміряти ефективну масу нейтрино Майорани та дослідити ряд ефектів за межами Стандартної моделі елементарних частинок (незбереження лептонного заряду, домішки правих струмів у слабкій взаємодії тощо). Низькотемпературні

сцинтиляційні болометри є надзвичайно перспективними детекторами для пошуку  $0\nu 2\beta$ -розпаду завдяки їхній високій енергетичній роздільній здатності, великій ефективності реєстрації шуканого ефекту та можливості розділення  $\alpha/\beta(\gamma)$ -подій.

Проект LUMINEU (Luminescent Underground Molybdenum Investigation for NEUtrino mass and nature) спрямований на пошук  $0\nu 2\beta$ -розпаду ізотопу  $^{100}\text{Mo}$  ( $Q_{2\beta} = 3034$  кеВ) за допомогою сцинтиляційних болометрів на основі кристалів молібдату цинку, збагачених ізотопом  $^{100}\text{Mo}$  ( $\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$ ). За допомогою програмного пакету GEANT4 були промодельовані енергетичні спектри фону 48 болометрів з циліндричними кристалами  $\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$  розміром  $\varnothing 60 \times 40$  мм, розміщених у кріостаті експерименту EDELWEISS у підземній лабораторії Модан (Франція). Досліджені компоненти фону, джерелами яких є внутрішня забрудненість кристалів, нейтрони, радіоактивна забрудненість конструкційних елементів детектора (космогенні радіонукліди та дочірні ізотопи рядів  $^{232}\text{Th}$  і  $^{238}\text{U}$ ). Внески до очікуваного фону в області  $0\nu 2\beta$ -розпаду  $^{100}\text{Mo}$  було оцінено на рівні  $\approx 4 \cdot 10^{-4}$  відліків/(кеВ·кг·рік).

Випадкові збіги подій (зокрема подій подвійного бета-розпаду) в низькотемпературних болометрах можуть бути одним з головних джерел фону під час пошуку процесу  $0\nu 2\beta$ -розпаду ядра  $^{100}\text{Mo}$ . Для болометрів з кристалами  $\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$  розмірами  $\varnothing 60 \times 40$  мм та часовою роздільною здатністю 45 мс рівень даного джерела фону становить  $\approx 0,016$  відліків/(кеВ·кг·рік) в енергетичному інтервалі 10 кеВ в околі очікуваного  $0\nu 2\beta$ -піку 3034 кеВ. Використовуючи світловий детектор на основі ефекту Неганова - Люка з відношенням сигнал/шум 750 та розроблені методи розділення сигналів за формою імпульсу, цей рівень фону можна зменшити до  $\approx 6,4 \cdot 10^{-5}$  відліків/(кеВ·кг·рік).

Загальний рівень фону в околі піку від  $0\nu 2\beta$ -розпаду  $^{100}\text{Mo}$  в детекторі з низькотемпературними сцинтиляційними болометрами з кристалами  $\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$  оцінено як  $\approx 5 \cdot 10^{-4}$  відліків/(кеВ·кг·рік). Це дає змогу досягти чутливості детектора, яка є достатньою для перевірки інвертованої схеми масових станів нейтрино.

## **О РАВНОПРАВНОМ СТАТУСЕ БОЗОННЫХ И ФЕРМИОННЫХ СОСТОЯНИЙ СПИНОРНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ДУБЛЕТА ЧАСТИЦА-АНТИЧАСТИЦА СПИНА $s = 1/2$**

**И. Ю. Кривский<sup>1</sup>, Т. М. Заяц<sup>2</sup>, С. Г. Шпырко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Институт электронной физики НАН Украины, Ужгород*

<sup>2</sup> *Ужгородский национальный университет, Ужгород*

<sup>3</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

В нерелятивистском приближении задача позитрония обычно рассматривается как система двух частиц. Позитроний трактуется как переопределение

электрон-позитронного дублета в связанном состоянии (связь возникает, например, в электромагнитном поле). Однако рассмотрение электрона по-отдельности от позитрона является, по-видимому, методологической ошибкой: элементарным релятивистским объектом следует считать именно электрон-позитронный дублет, то есть 4-х компонентное состояние (а не электрон или позитрон по-отдельности).

Для электрон-позитронного дублета формулируется модель поля  $\psi$  с использованием модификации аксиоматического подхода (А-подхода) [1] для спинорного поля. Аксиома A1 (о пространстве состояний поля) формулируется как принадлежность  $\psi$  к пространству пробных функций Шварца  $S(3,4)$  (а не пространству обобщенных функций Шварца  $S(3,4^*)$ , как в традиционном подходе [1]). Анализ делается в представлении Фолди - Вутхойзена (FW) [2], для которого мы нашли релятивистски-инвариантную квантово-механическую форму уравнения движения.

Этот результат можно получить строго при помощи специального расширения используемой алгебры гамма-матриц, которая трактуется как вещественная, и в которой оператор комплексного сопряжения  $C$  становится таким же существенным оператором, как и  $i$  в комплексном пространстве (см. [3]). За счет этого стандартная 16-мерная клиффордова алгебра расширяется до 29-мерной вещественной так называемой расширенной CD-алгебры (ERCD). Эта алгебра содержит два принципиально важных сохраняющихся 4-х компонентных спина: один хорошо известный фермионный  $(1/2, 1/2)$  спин электрон-позитронного дублета, а другой – бозонный  $(1, 0)$ , или тензорно-скалярный спин.

Квантовомеханическое 4-х компонентное уравнение имеет два непересекающихся множества решений, определяемых полными наборами (максимальный набор операторов, коммутирующих с гамильтонианом и включающий носители внутренних степеней свободы, а именно – сохраняющихся фермионного и бозонного спина): одна система решений является собственными решениями для электрона и позитрона, другая – для спиральности антисимметричного тензора 2-го ранга (каким является, например, состояние  $\pi$ -триплета с присоединенным  $\rho$ -мезоном).

Фермионные и бозонные состояния, таким образом, при данной формулировке получают равноправный статус в описании электрон-позитронного дублета [4].

Квантовая теория этого объекта, ранее предполагавшая фермионное квантование спинорного поля, фактически получается построением пространства Фока над состояниями одного 4-х компонентного объекта, в полной аналогии с вторичным квантованием нерелятивистской квантовой механики – перехода от конфигурационного пространства к пространству чисел заполнения. Это пространство содержит как симметричные, так и антисимметричные секторы – фермионные и бозонные состояния.

1. *Bogoliubov N.N., Logunov A.A., Todorov I.T.* Introduction to Axiomatic Quantum Field Theory. Reading, Mass.: W. A. Benjamin, Advanced Book Program, 1975.
2. *Foldy LL.* Synthesis of Covariant Particle Equations // Phys. Rev. - 1956. - Vol. 102, No. 2. - P. 568 - 581.
3. *Gürsoy F.* Connection between charge independence and conservation of baryon number with the Pauli transformation // Nuovo Cim. - 1958. - Vol. 7, No. 2. - P. 411 - 415.
4. *Simulik V.M., Krivsky I.Yu.* Bosonic symmetries of the Dirac equation // Phys. Lett. A. - 2011. - Vol. 375, No. 25. - P. 2479 - 2483.

## Тези доповідей з атомної енергетики

### ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ, РАЗВИТИЯ И СВОЙСТВ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙСЯ ЦЕПНОЙ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ В ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАССАХ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

В. А. Бабенко<sup>1</sup>, В. Н. Павлович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев*

<sup>2</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

В 1990 и 1996 гг. на объекте «Укрытие» (ОУ) были зафиксированы два нейтронных инцидента, суть которых состоит в повышении плотности потока нейтронов в подреакторных помещениях с последующим выходом в режим нейтронных осцилляций. Ответа на вопрос, чем закончились эти инциденты, не существует, так как искусственным образом детекторы нейтронов были заэкранированы путем залива помещения 304/3 раствором гадолиния. В настоящее время понятно, что самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция (СЦР) могла развиваться только в помещении 305/2, где расположены основные скопления ядерного топлива. Оба эти инцидента связывают с большим количеством осадков, которые выпадали в районе ОУ в указанное время.

В работе [1] на основе простой системы уравнений были проанализированы возможные режимы поведения топливосодержащих масс (ТСМ) при их заливе водой и были получены качественные картины роста потока нейтронов с выходом в осциллирующий режим, которые качественно совпадают с наблюдаемыми в ОУ. При этом основной характеристикой ТСМ, которая обуславливала такое поведение плотности потока нейтронов, являлась зависимость реактивности системы от количества воды в ТСМ, которая имела явно выраженный максимум при некотором содержании воды. Картина с осцилляциями возникает только тогда, когда реактивность в максимуме становится выше нуля и объясняется сменяемыми режимами залива водой с ее испарением вследствие повышения температуры ТСМ выше точки кипения воды.

В связи со строительством «Укрытия-2» ожидается, что внешнее поступление воды в помещения ОУ будет полностью прекращено, правда не совсем ясно, будет ли поступать конденсат, т. е. будет ли установлен режим постоянной температуры и влажности. Тем не менее, в связи с эти возникают следующие вопросы, на которые в работе [1] не было получено ответов: в каком состоянии находятся ТСМ в настоящее время – в подкритическом состоянии с большим количеством воды, превышающем точку максимума («закритическом» состоянии), или в подкритическом состоянии с малым количеством воды; возможен ли вообще переход в «закритическое» состояние при реальных скоростях залива водой; что произойдет при осушении ТСМ в случае, если состояние «закритическое». Интересны также вопросы о возможности

оценки скорости залива водой по экспериментальным данным и об оценке максимальной реактивности ТСМ по величине осцилляций. Понятно, что использование простых выражений для «периода реактора» в данном случае некорректно, так как эти выражения получены для случая постоянной реактивности. В нашей ситуации реактивность является переменной величиной, зависящей от скорости залива ТСМ водой. Данная работа в основном посвящена попыткам ответа на поставленные вопросы. При этом мы будем базироваться на системе уравнений, сформулированной в [1]. Система уравнений решалась численно с достаточно реалистичными параметрами, получено также аналитическое решение в докритической области.

1. Babenko V.A., Jenkovszky L.L., Romanov V.N. et al. Fuel-Containing Masses of Chernobyl Unit 4: Multiplying Properties and Neutron Characteristics // Nucl. Sci. Eng. - 1999. - Vol. 133, No. 3. - P. 301 - 313.

### **ВЕРИФІКАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ, ЯКІ ВИКОНУЮТЬСЯ ПРОГРАМНИМИ ЗАСОБАМИ ДОЗИМЕТРІЇ ЗРАЗКІВ-СВІДКІВ І КОРПУСІВ РЕАКТОРІВ ВВЕР**

**В. М. Буканов, В. В. Ількович, В. Л. Дем'яохін,  
О. В. Грищенко, С. М. Пугач**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Безпека експлуатації реакторних установок залежить, головним чином, від надійності захисних бар'єрів, що перешкоджають виходу продуктів реакції ділення в навколишнє середовище. Для енергоблоків з водо-водяними реакторами одним з найбільш важливих бар'єрів безпеки є його корпус. Безумовною вимогою до корпусу реактора (КР) є збереження цілісності при штатних умовах експлуатації та при будь-яких проектних аваріях. Отже, забезпечення надійної та безпечної експлуатації реактора і реакторної установки в цілому не можливе без контролю стану металу КР протягом усього призначеного терміну служби.

Важливим джерелом інформації про зміну властивостей металу КР в умовах експлуатації енергоблоків АЕС є програма зразків-свідків (ЗС). Разом з тим, результати випробувань ЗС є представницькими тільки в тому випадку, якщо з необхідною точністю відомі умови опромінювання як самих зразків у реакторі, так і певних зон корпусу.

Визначення умов опромінення КР і ЗС металу корпусу здійснюється за допомогою спеціальних методик, основу яких становлять розрахунки переносу нейтронів. Для виконання розрахунків спеціалістами Інституту ядерних досліджень НАН України було розроблено пакети програм MСРV і MСSS.

Методики дозиметрії ЗС і КР дають змогу отримувати дані, які необхідні для прийняття рішення про подовження строку експлуатації енергоблоку

понад встановлений проектом. Разом з тим, обґрунтованість цього рішення значною мірою залежить від вірогідності визначення потоку нейтронів, що діє на КР і ЗС. Вірогідність визначення потоку може бути підтверджена тільки шляхом виконання верифікації та валідації використовуваних методик.

Наукове вчення про порядок проведення верифікації та валідації програмних засобів, по суті, зародилося відносно недавно – в кінці минулого століття. Тому нині відсутні не тільки загальноприйнятий підхід до верифікації та валідації, але й загальноприйнята термінологія.

З метою верифікації та валідації програмних засобів дозиметрії ЗС і КР спеціалістами Інституту ядерних досліджень НАН України ведеться розробка такої методики [1, 2]. Ця методика попри все інше передбачає проведення верифікації в декілька етапів, одним з яких є верифікація розрахунку. Етап верифікації розрахунку може включати перевірки на відповідність результатів розрахунків із заздалегідь отриманими аналітичними рішеннями і перепрограмування критичних компонентів, аби визначити, чи отримані ті ж самі результати. Окрім цього, частиною верифікації розрахунку може бути порівняння отриманих з його допомогою результатів з результатами розрахунків, отриманих за допомогою інших програмних засобів.

У даній роботі наведено деякі результати верифікації розрахунків, які виконуються за допомогою програмних засобів MCPV і MCSS. У рамках цих робіт порівнювалися результати розрахунків переносу нейтронів, які виконані цими програмними засобами, і MCNP, а також запропоновано унікальний спосіб порівняння результатів, який ґрунтується на припущенні, що систематичні похибки результатів цих розрахунків мають псевдовипадковий характер.

1. *Буканов В.Н., Демехин В.Л., Липский И.И.* Основные положения процедуры верификации программных средств, используемых при дозиметрии корпуса реактора // Ядерна фізика та енергетика. - 2008. - № 1(23). - С. 62 - 68.
2. *Демехин В.Л., Илькович В.В., Буканов В.Н.* Верификация и валидация: процесс vs процедура // Ядерна фізика та енергетика. - 2013. - Т. 14, № 2. - С. 150 - 153.

## **АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА В ПОНАДПРОЕКТНИЙ ПЕРІОД ЗБЕРІГАННЯ**

**В. В. Гальченко**

*Інститут підтримки експлуатації АЕС, Київ*

У роботах [1], присвячених застосуванню кредиту вигорання при обґрунтуванні зберігання відпрацьованого ядерного палива, показано динаміку зміну коефіцієнта розмноження нейтронів для таких систем із часом витримки. Показано [2], що протягом перших 400 год після зупинки реактора, коефіцієнт розмноження нейтронів зростає, за рахунок  $\beta^-$ -розпаду  $^{239}\text{Np}$  і напрацювання  $^{239}\text{Pu}$ .



Далі, до 20 років, відбувається інтенсивне зниження коефіцієнта розмноження нейтронів, що пов'язано з розпадом подільного матеріалу  $^{241}\text{Pu}$ .

В інтервалі часу витримки від 20 до 60 років інтенсивність зниження суттєво зменшується, а після 60 років коефіцієнт розмноження практично не змінюється з часом витримки палива, і навіть має невеликий тренд на збільшення, починаючи з 90 років. Динаміка поведінки коефіцієнта розмноження нейтронів в період часу від 20 до 100 років обумовлена тим, що основні поглиначі нейтронів вже напрацьовані, а подільні ізотопи, з середнім часом життя вже розпалися і мало впливають на розмноження системи.

Але аналіз характеристик системи з відпрацьованим ядерним паливом з часом витримки більшим за 100 років, показує, що далі коефіцієнт розмноження нейтронів має стійку тенденцію на зростання, що пов'язано з розпадом  $^{241}\text{Am}$  і  $^{240}\text{Pu}$  [3].

1. Гальченко В.В., Макодим В.І., Соловійов В.В., Лькович В.В. Урахування вигорання ядерного палива при обґрунтуванні ядерної безпеки систем зберігання та транспортування відпрацьованого ядерного палива РВПК-1000 // Ядерна фізика та енергетика. - 2010. - Т. 11, № 4. - С. 415 - 420.
2. Гальченко В.В., Соловійов В.В., Городніча О.С. Урахування вигорання ядерного палива при обґрунтуванні ядерної безпеки систем зберігання відпрацьованого ядерного палива // Ядерна та радіаційна безпека. - 2012. - Вип. 2(54). - С. 45 - 50.
3. NUREG/CR-6811 ORNL/TM-2001/257 - Strategies for Application of Isotopic Uncertainties in Burnup Credit / Prepared by I. C. Gauld. - Oak Ridge National Laboratory.

## МЕТОДИКИ ОТРИМАННЯ ГОМОГЕНІЗОВАНИХ МАКРОСКОПІЧНИХ ПЕРЕРІЗІВ

**В. В. Гальченко, А. А. Мішин**

*Інститут підтримки експлуатації АЕС, Київ*

При проведенні малогрупових розрахунків різних станів реакторної установки важливе значення мають питання підготовки мало групових констант. Від того, як це було зроблено, залежить точність і якість подальших розрахунків кінетики реактора.

Гомогенізовані мало групові нейтрони перерізи залежать від різних характеристик, які характеризують матеріальний склад і тепло гідравлічні характеристики активної зони реактора. Для можливості подальшого використання перерізів взаємодії їх зазвичай представляють деякою функцією, з якої їх можливо відновити для будь-яких значень стану активної зони.

Одним зі шляхів отримання макроскопічних характеристик є вибір точки «опорного» стану при обраних умовах (робочий стан), а потім змінювати

значення кожного параметру стану. Розкладання функції, яка описує залежність перерізів від значення параметру, який змінюється, в ряд Тейлора, надалі можливо використовувати для подальших розрахунків.

Інший метод полягає в інтерполяції, або апроксимації залежностей перерізів за допомогою тензорних добутків базисних функцій. В якості таких функцій часто використовують кусочно-лінійні функції.

Відновлення і визначення параметрів реакторної установки в будь-якому стані фактично виконується за допомогою саме розрахункового аналізу. Тому методика [1], яка використовується для підготовки макроскопічних характеристик вимагає детального вивчення для розуміння меж її застосування і подальших шляхів модернізації.

1. *Жолкевич Е.А.* Аппроксимация зависимостей нейтронно-физических характеристик решеток ВВЭР от параметров состояния активной зоны. Программа ОКА. - М., 1982. - 69 с. - (Препр. / ИАЭ; 3558/5).

## **ЗМІЦНЕННЯ ФІЗИЧНОЇ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ – СУВОРА НЕОБХІДНІСТЬ СЬОГОДЕННЯ**

**В. І. Гаврилюк, А. В. Гаврилюк-Буракова, С. С. Драпей, О. П. Романова**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Сучасний стан терористичної діяльності в світі застосування терористів-смертників, як засобів вчинення терористичних актів, вчинення масштабних терористичних актів з загибеллю великої кількості мирних людей вимагає розроблення та негайного застосування нових підходів до боротьби як з міжнародним, так і регіональним тероризмом.

Особливо принципове значення має запобігання та виявлення спроб вчинення терористичних актів щодо ядерних установок та ядерних матеріалів, недопущення використання ядерних установок в терористичних цілях.

Зміцнення фізичної ядерної безпеки ядерних установок та ядерних матеріалів є однією з основних умов забезпечення безпеки держави. В той же час необхідно підкреслити, що в Україні є низка невіршених питань, пов'язаних з фізичною ядерною безпекою.

Автори, виходячи з двадцятирічного досвіду праці в сфері фізичного захисту, обліку та контролю ядерного матеріалу, пропонують шляхи розв'язання деяких проблем фізичної ядерної безпеки ядерних установок, інших радіаційно-небезпечних об'єктів.

Серед піднятих авторами питань є:

- необхідність внесення змін в законодавство України в сфері використання ядерної енергії та радіаційної безпеки;
- введення в Україні спеціальності «фізична ядерна безпека»;
- підготовка фахівців з фізичної ядерної безпеки;
- підвищення кваліфікації фахівців у сфері фізичної ядерної безпеки.

# КОМПЛЕКС ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ ЯДЕРНИХ УСТАНОВОК ТА ЯДЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

**В. І. Гаврилюк, С. С. Драпей, О. О. Левіна, В. В. Пархоменко,  
О. П. Романова, А. В. Самсоненко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Застосування комплексів інженерно-технічних засобів систем фізичного захисту ядерних установок дає змогу зменшити вплив людського фактора на безпеку ядерних установок та ядерних матеріалів.

Вже декілька років при Навчальному центрі з фізичного захисту, обліку та контролю ядерного матеріалу ІЯД НАН України функціонує Навчально-тренувальний майданчик «Комплекс інженерно-технічних засобів системи фізичного захисту».

Комплекс призначений для:

навчання українських фахівців з фізичного захисту, які проектують, монтують, налагоджують та експлуатують інженерно-технічні засоби систем фізичного захисту;

тестування сучасних технічних засобів виявлення, телевізійного спостереження, контролю та управління доступом, програмного забезпечення, які пропонуються постачальниками для використання в системах фізичного захисту, що будуються, реконструюються та технічно переоснащуються, з метою встановлення відповідності їхніх характеристик вимогам законодавства;

ознайомлення керівного персоналу експлуатуючих організацій, представників відповідних державних органів з сучасними технологіями фізичного захисту ядерних установок та ядерних матеріалів.

Розроблено пропозицій щодо застосування низки технічних засобів фізичного захисту, в першу чергу вітчизняного виробництва, в системах фізичного захисту ядерних установок України. Проведено первинне навчання та підвищення кваліфікації з оперативного управління та технічної експлуатації інженерно-технічних засобів майже 200 осіб, з яких 8 фахівців отримали дипломи державного зразка на право здійснення оперативного управління системою фізичного захисту АЕС.

Біля 1000 слухачів курсів, що проводилися Навчальним центром, ознайомилися з основними принципами побудови комплексів інженерно-технічних засобів систем фізичного захисту та 55 високопосадовців державних органів ознайомилися з сучасними технологіями фізичного захисту ядерних установок та ядерних матеріалів. Крім того, в рамках обміну кращою практикою Навчально-тренувальний майданчик «Комплекс інженерно-технічних засобів системи фізичного захисту» відвідало 73 іноземних фахівця з США, Японії, Швеції, Норвегії, Австрії, Європейської Комісії та МАГАТЕ.

## ОЦІНКА КАТАСТРОФІЧНИХ РИЗИКІВ І ЗБИТКІВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

М. М. Гаврилюк, С. І. Азаров

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Погіршення екологічної обстановки, помітне збільшення кількості природних і антропогенних катаклізмів, а також чітке усвідомлення обмеженості матеріально-технічних і кадрових ресурсів для рішення завдань безпеки приводять до свідомих пошуків оптимального наукового підходу до забезпечення безпеки. Дослідження техногенного ризику як основного показника безпеки систем не втрачають своєї актуальності. У рамках технократичної концепції аналізу ризику виробляється оцінка частоти виникнення вихідних подій аварій і пов'язаних з ними потенційних збитків. Залежно від вихідної інформації методики оцінки ризику можуть бути наступних видів: інженерні статистичні, коли ймовірності визначаються за наявними статистичними даними; інженерні теоретико-імовірнісні, що використовуються для оцінки ризиків від рідких подій, коли статистика практично відсутня; модельний – побудова моделей впливу шкідливих факторів на людину і навколишнє середовище як при нормальній, так і при аварійній експлуатації систем; експертні (евристичні), що засновані на використанні суб'єктивних імовірностей, одержуваних за допомогою експертного оцінювання, використовуються при оцінці комплексних ризиків від сукупності небезпек, коли відсутні не тільки статистичні дані, але й математичні моделі.

Дослідження цих процесів можливо на основі нових інформаційних технологій, найважливішою частиною яких є математичні моделі. У даній роботі розглянута можливість застосування методу Монте-Карло до аналізу й оцінки катастрофічних ризиків шляхом статистичного моделювання. Цей метод є аналітичним методом формалізованого опису невизначеності і використовується у найбільш складних для прогнозування ризиках. Він заснований на застосуванні імітаційних моделей, що дають змогу створити безліч сценаріїв, які погоджуються із заданими обмеженнями. Тобто, при відомих законах розподілу змінних можна за допомогою певної методики одержати не єдине значення, а розподіл показника ризику. Підбор закону розподілу змінних здійснюється як на даних об'єктивних спостережень, так і на експертних оцінках.

Математична модель перераховується при кожному новому імітаційному експерименті, протягом якого значення основних невизначених змінних вибираються випадковим чином на основі генерування випадкових чисел. Потім значення кожної незалежної змінної відновлюється як аргумент функції розподілу ймовірностей даної змінної. Значення змінних величин підставляються в модель і розраховується інтегральний показник збитковості. Цей алгоритм повторюється  $N$  разів. Кожен імітаційний експеримент – це випадковий сценарій. Точність підбираемого закону розподілу збитковості і його

характеристик залежить від кількості імітаційних моделей  $N$ . Далі вибірка з  $N$  значень збитковості аналізується графічним або кількісним методом. У зв'язку з тим, що ймовірність кожного сценарію дорівнює  $P_i=1/N$ , то ймовірність того, що проектне значення збитковості буде нижче певного значення, буде дорівнює кількості результатів, при яких значення збитковості було нижче цього значення помноженому на ймовірність реалізації одного спостереження. Побудувавши графік кумулятивного розподілу частот появи результатів можна розрахувати ймовірність того, що збитковість буде нижче або вище заданого значення. Показник очікуваного значення збитковості являє собою агрегування у вигляді однини всієї інформації, наявної у розподілі ймовірностей збитковості. Для класичних ризиків таким показником є зважена середня значень всіх можливих збитковостей, в якості терезів використовують ймовірності кожного результату. Для катастрофічних ризиків середнє не є характеристикою. В даному випадку повинні використовуватися інші підходи до оцінки і прогнозу величини ризику таких розподілів, що дають коректні і стійкі результати. Розподіли з «важкими хвостами», які описують катастрофічні ризики і збитки зростають нелінійно. Нелінійне зростання збитковості з часом відповідає безкінечному значенню математичного очікування величини збитковості.

Моделювання катастрофічного ризику як функції випадкових величин ймовірності вихідних подій  $Q$  і збитків від них  $C$  можуть оцінюватися лог-нормальним методом, методами Гауса, Релея, Вейбула або Стьюдента. Аналітичні вирази для функцій щільності  $f_k(r)$  залежать від параметрів відповідних законів розподілу. Визначення параметрів законів розподілу  $f_Q(g)$  і  $f_C(g)$  можна отримати двома шляхами: перший – за статистичними даними експлуатації конкретного об'єкта або його аналогу, другий – методами математичного моделювання на ПОК. Другий шлях, звичайно, має свої переваги і недоліки у порівнянні з першим. Для першого шляху точність отримання параметрів законів розподілу випадкових велич з експлуатаційних, статистичних даних завжди пов'язаний з проблемами обробки малих вибірок.

## **РОЗРАХУНОК ВКЛАДУ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАРІННЯ В РАДІАЦІЙНЕ ОКРИХЧУВАННЯ КОРПУСНИХ СТАЛЕЙ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС УКРАЇНИ**

**М. Г. Голяк, Л. І. Чирко, Ю. С. Гульчук**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Розроблений метод розрахунку величини радіаційного окрихчування з урахуванням вкладу температурного старіння, розроблений в НДЦ «Курчатівський інститут», увійшов як складова до рекомендацій МАГАТЕ NULIFE Guidelines-2012 стосовно оцінки цілісності і ресурсу компонентів ВВЕР атомних електростанцій. Цей підхід розділяє окрихчування металу корпусу реакто-

ра в умовах експлуатації (опромінення при температурі теплоносія) на два вклади: радіаційну і теплову крихкість. Дозову залежність критичної температури крихкості для радіаційної складової за цим методом можна визначати як за хімічним складом, так і за результатами випробувань зразків-свідків.

В роботі в рамках матеріалознавчого супроводу безпечної експлуатації корпусів реакторів ВВЕР-1000 проведено розрахунки дозових залежностей критичної температури крихкості  $T_K(F)$  для критичних конструктивних елементів корпусів реакторів енергоблоків АЕС України за вимогами NULIFE Guidelines-2012 і діючих на Україні нормативних документів.

Також проведено порівняння отриманих залежностей з максимально допустимими значеннями температури в'язко-крихкого переходу  $T_K^a$  і оцінено термін безпечної експлуатації досліджених КР за двома підходами.

Оскільки нормативна за NULIFE Guidelines-2012 залежність окрихчування під опроміненням зварних швів ВВЕР-1000 є сумою двох доданків, одним з яких є функціональна залежність від часу витримки теплового окрихчування, то дослідження температурного старіння металу зварних швів є необхідним для врахування і коректного прогнозу радіаційного окрихчування зварних швів ВВЕР-1000, які, в більшості випадків, лімітують радіаційний ресурс корпусів ВВЕР-1000. У роботі [1] наведено емпіричну формулу зсуву критичної температури теплового старіння від часу витримки:

$$\Delta T_T = 1,67 \cdot Ni^4 \cdot \exp(-0,02 \cdot T_{K0}) \cdot (1 - \exp(-3,7 \cdot 10^{-6} \cdot t))^{0,43} \pm 17,5(^{\circ}C),$$

де  $1,08 \% \leq Ni \leq 1,89 \%$ . Наведена формула пропонується як проект нормативної залежності для опису ефектів температурного старіння матеріалів зварних швів ВВЕР-1000 в інтервалі температур 310 - 320 °С. При цьому припускають, що при збільшенні часу витримки буде спостерігатися зростання критичної температури крихкості  $T_T$ .

Для українських корпусів реакторів ВВЕР-1000 випробувано по 2-3 комплекти температурних зразків-свідків. Отримані результати зсуву критичної температури крихкості від часу витримки під кришкою реактора дуже різняться для різних корпусів.

Зважаючи на пропозицію розглядати вищенаведену формулу як нормативну, необхідно розрахувати всі доступні дані для температурних комплектів зразків-свідків за цією формулою. Розрахунки проведені для матеріалу зварних швів, для яких в Паспорті або в Формулярі чи Технічному рішенні наведено значення критичних температур крихкості у вихідному стані  $T_{K0}$ .

1. *Чернобаева А.А. и др.* Влияние химического состава на температурное старение материалов корпусов ВВЭР-1000 // Матеріали 9-ї міжнар. наук.-техн. конф. «Забезпечення безпеки АЕС з ВВЕР» (м. Подольськ, Росія, 19 - 22 травня 2015 р.). - ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕС».

# ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ШУМОВОЇ ДІАГНОСТИКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ БЕЗПЕКИ ВВЕР

**В. В. Горанчук, В. І. Борисенко**

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ*

Шуми енергетичного реактора представляють собою складні взаємопов'язані явища нейтронної фізики, теплогідравліки, акустики і механіки. Їхня інтерпретація дає змогу створювати інструмент ранньої діагностики стану РУ – шумову діагностику. Нейтронно-шумова діагностика базується на моніторингу флуктуаційних складових нейтронного потоку.

Головним завданням віброшумового діагностування є визначення вібростану обладнання на основі аналізу зміни частотних характеристик, як за міжремонтний період, так і за час життя реакторної установки. Отримання частотних характеристик сигналу базується на виконанні швидкого перетворення Фур'є.

Системи віброшумового контролю реакторної установки базуються на непрямих вимірюваннях, наприклад, на вимірюваннях флуктуючих компонент сигналів штатних детекторів. Для більшості систем віброшумової діагностики (СВШД) використовують сукупність датчиків переміщень, встановлених на обладнанні та корпусі реактора, датчиків пульсацій тиску теплоносія і датчиків нейтронного потоку системи внутрішньореакторного контролю (СВРК) та апаратури контролю нейтронного потоку (АКНП).

Зміна в часі спектральних характеристик дає змогу оцінювати і прогнозувати реальний віброресурс обладнання, не допускаючи його раптових відказів, знати до моменту початку планового ремонту «слабкі» місця обладнання, насамперед того, що підлягає ремонту або заміні.

У роботі вперше представлені окремі результати зміни спектральних характеристик шумової складової нейтронних детекторів СВРК і АКНП протягом паливної кампанії. Збір та аналіз такої інформації дає можливість робити висновки про зміни вібростану внутрішньокорпусних пристроїв і тепловіділяючих збірок.

Також у роботі розглянуто питання можливості визначення коефіцієнта реактивності по температурі теплоносія (ТКР) в СВШД. Температурний коефіцієнт реактивності є важливим параметром, який суттєво впливає на безпеку реактора [1]. Значення ТКР повинно знаходитися в певних межах. Шумова оцінка ТКР базується на тому факті що температура теплоносія має малі флуктуації і ці флуктуації викликають флуктуації нейтронного потоку. Визначення ТКР базується на обробці даних нейтронного шуму і шуму температури теплоносія.

1. *Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском.* НП 306.2.145-2008.

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ РАДІАЦІЙНОГО ЗАХИСТУ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ АЕС ЗА ДОПОМОГОЮ МОНТЕ КАРЛО КОДУ SERPENT

**В. І. Гулік**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Після аварії на АЕС Фукусіма особливо гостро постало питання надійності бетонних конструкційних матеріалів атомних електростанцій. Такі матеріали мають задовільняти наступні основні вимоги: 1. Забезпечувати міцність бетонних матеріалів протягом всього строку експлуатації ядерного реактора та протягом часу виведення його з експлуатації; 2. Забезпечувати необхідний радіаційний захист для персоналу АЕС.

У даній роботі були досліджені властивості радіаційного захисту нових будівельних матеріалів АЕС основаних на суміші цемент-базальтова фібра (ЦБМ). Автор проаналізував можливості застосування представленого матеріала у різних конструкціях атомної енергетики (атомні електростанції, сховища відпрацьованного ядерного палива, сховища для радіоактивних відходів тощо).

У представленому дослідженні були використані чотири типи бетонів з різною кількістю базальтової фібри. Властивості радіаційного захисту у відношенні гамма випромінювання були досліджені за допомогою коду WinXCom. Властивості радіаційного захисту у відношенні нейтронного випромінювання були досліджені за допомогою коду Serpent. Були отримані та проаналізовані коефіцієнти послаблення радіаційного випромінювання для різних композицій бетону та базальтової фібри.

## КОЭФИЦИЕНТЫ ЗАПАСА ДЛЯ ФЛЮЕНСОВ НЕЙТРОНОВ В РАБОТАХ ПО ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

**В. Л. Демехин, А. М. Пугач, А. В. Гриценко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Пакет программ MCRPV, который используется в работах по определению условий облучения корпуса реактора ВВЭР и внутрикорпусных устройств, прошел процедуру верификации и валидации. Среди прочего, это означает, что получаемые с его помощью значения функционалов нейтронного потока (ФНП) являются хорошей оценкой их истинных значений и могут напрямую использоваться во многих случаях.

В то же время, при расчетах, связанных с оценкой безопасности АЭС, согласно общемировой практике и ряду действующих нормативных документов требуется использование консервативных подходов, что подразумевает необходимость учета ошибки определения, прежде всего, флюенса нейтронов.



Эта проблема достаточно сложна и не имеет однозначного абстрагированного решения во многом из-за того, что заранее невозможно предугадать степень консерватизма используемой методики соответствующих расчетов. Поэтому окончательное решение о том, какие значения ФНП в них использовать, и обоснование этого выбора должно быть дано организацией, которая эти расчеты выполняет. Тем не менее, можно дать некие общие рекомендации, опирающиеся на теорию ошибок, особенности используемой программы расчета переноса нейтронов и получаемые с ее помощью результаты.

Требование об учете ошибки определения флюенса нейтронов с  $E_n > 0,5$  МэВ подразумевает, что вместо полученного как результат расчетов переноса нейтронов значения  $\Phi_{0,5}$  необходимо использовать значение

$$\Phi^{[P]} = \Phi_{0,5} + \Delta^{[P]} = K_3^{[P]} \cdot \Phi_{0,5},$$

где  $\Delta^{[P]}$  - ошибка определения флюенса с доверительной вероятностью  $P$ ,  $K_3^{[P]} = 1 + \Delta^{[P]}/\Phi_{0,5}$  - коэффициент запаса с доверительной вероятностью  $P$ .

Очевидно, что термин «доверительная вероятность» в подобных задачах следует рассматривать как «одностороннюю» вероятность того, что истинное значение не превысит верхнего предела. Выбор величины доверительной вероятности является первой задачей, которую необходимо корректно решить в условиях отсутствия достаточного количества информации о законе распределения ошибок.

Известно, что  $\Delta^{[0,95]} = 1,6 \sigma$  для большинства практически реализуемых случайных распределений. Поэтому предлагается использовать величину доверительной вероятности 95% при определении абстрагированной величины ошибки флюенса, которую необходимо учитывать в работах, связанных с безопасностью АЭС.

На ряде примеров рассматривается влияние на величину коэффициента запаса ошибок, обусловленных неточным знанием геометрии конкретной реакторной установки. Показано, что основной вклад в величину коэффициента запаса, как правило, дает методологическая ошибка программы расчетов переноса нейтронов.

## **АНАЛІЗ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ОЦІНКАХ ЕФЕКТИВНОСТІ СФЗ**

**В. М. Євланов<sup>1</sup>, С. І. Азаров<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup> Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки  
НАН України, Київ*

*<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

В даний час існує безліч методів аналізу та оцінки ефективності систем фізичного захисту (СФЗ) [1].

У доповіді розглянуто основні програми, які використовуються для оцінки СФЗ в США і Південній Кореї.

Починаючи з етапу проектування і протягом усього терміну експлуатації, СФЗ вимагає регулярної оцінки ефективності. Оцінка ефективності – це процедура, що проводиться в рамках аналізу уразливості і спрямована на визначення якісних або кількісних показників ефективності, виявлення критичних елементів а також визначення інтегрального показника ефективності системи в цілому [2].

Розглядалися детерміністичний, логіко-імовірнісний (ЛІВ) і часово-імовірнісний аналіз (ЧІ).

Детерміністичний підхід ґрунтується на нормативних документах.

Великим потенціалом оцінки ефективності СФЗ володіють ЛВ методи. За допомогою алгебри логіки аналізуються умови попадання системи в небезпечний стан.

У США був розроблений ЧІ метод. Показником ефективності тут служить імовірнісна величина, що оцінює шанси сил реагування прискітки акції порушника. У рамках цього методу були розроблені такі комп'ютерні програми, як SAVI, ASSESS, SAPE, BEGA-2 і т. д. Всі вони використовують різні механізми підрахунку, користуються різними вхідними та вихідними даними, мають різну чутливість до різних факторів. Результативність кожного з наведених вище пакетів залежить від алгоритмів, застосовуваних на програмному рівні. Також досліджені алгоритми, на яких ґрунтуються ці програми. Для оцінки ефективності СФЗ, використовувалися поняття конфліктології - науки, яка займається вивченням закономірностей виникнення, розвитку, завершення конфліктів, як найбільш гострих способів вирішення протиріч. В якості об'єкта конфліктології використовувався конфлікт «людина - система», де людина виступала у ролі порушника, а системою вважалась СФЗ. Основою роботи є припущення щодо можливості контролю розвитку різного роду інцидентів в системах, що мають відношення до безпеки - фізичної та технологічної. Запропонована графічна модель, яка паралельно відображає часові рамки дій порушника, проникаючого на об'єкт з метою диверсії, та етапів розвитку конфлікту. Також закладені основи математичного опису даної моделі для подальшого створення методики для оцінки ефективності СФЗ. У результаті проведеної роботи отриманий і протестований пілотний програмний продукт, який допоможе дати адекватну оцінку існуючим СФЗ.

1. *Наказ* Держатомрегулювання України від 28.08.2008 № 156 «Про затвердження Загальних вимог до систем фізично захисту ядерних установок та ядерних матеріалів».
2. *Наказ* Держатомрегулювання України від 20.12.2010 №179 «Про затвердження Вимог до оцінки стану системи фізичного захисту ядерної установки».

## ПОРІВНЯННЯ КУЛЬТУРИ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ЯДЕРНОЇ ЗАХИЩЕНОСТІ

**В. М. Євланов<sup>1</sup>, С. І. Азаров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки  
НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Сфери діяльності щодо забезпечення ядерної безпеки та ядерної захищеності є взаємодоповнюючими і спрямовані на досягнення єдиної мети безпеки АЕС, яка полягає в захисті людей і довкілля від неприпустимого радіаційного впливу. Розглядаючи питання синергії між ядерною безпекою та ядерною захищеністю, особливу увагу приділено виявленню інтерфейсу між двома сферами безпеки й визначенню загальних принципів розробки заходів ядерної безпеки та ядерної захищеності.

На АЕС при проведенні заходів щодо підвищення ядерної та радіаційної безпеки, як правило, особлива увага приділяється установці сучасних технічних засобів захисту ядерних та радіаційної матеріалів. Незважаючи на важливість технічних засобів, їхня ефективність безпосередньо залежить від рішень, прийнятих персоналом. Виходячи з цього, підвищення не тільки технічної складової безпеки, але і мотивації персоналу слідувати встановленим нормам, правилам, заходам і процедурам, є запорукою безпеки на АЕС. Зазначені цілі досягаються шляхом впровадження культури безпеки на АЕС. Запропонована робота проведена на підставі аналізу документів МАГАТЕ, в галузі культури ядерної безпеки та ядерної захищеності:

- проведено порівняльний аналіз документів МАГАТЕ, інших міжнародних організацій з метою виявлення рекомендацій по організації протидії загрози несанкціонованих дій у відношенні ядерних установок, ядерних матеріалів, радиоактивних відходів та інших джерел іонізуючого випромінювання;
- проведено порівняльний аналіз документів міжнародного і національного законодавства з метою виявлення конфліктуючих положень і визначення можливих шляхів їхнього усунення;
- розроблено перелік національних нормативних актів, які визначають політичні установки, технічні та ресурсні фактори, що впливають на створення та функціонування загальнодержавної моделі загрози;
- розроблений перелік і сформульовані вимоги щодо розробки необхідних, але відсутніх актів, обґрунтований оптимальний рівень актів (законів України, міжнародних актів тощо).

Розглянута трирівнева модель організаційної культури безпеки Едгара Шейна, адаптована для АЕС. Проведено порівняльний аналіз характеристик культури ядерної безпеки та ядерної захищеності та визначено їхні подібні та відмінні риси.

1. *Safety culture in nuclear installations: guidance for use in the enhancement of safety culture.* - Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002.
2. *Nuclear security culture: implementing guide.* - Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008.
3. *Шейн Э.Х.* Организационная культура и лидерство / Пер. с англ. под ред. В. А Спивака. - СПб: Питер, 2002. - 336 с.

## **ПРОБЛЕМИ ЧУТЛИВИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДАТЧИКІВ КОНТРОЛЮ АВАРІЙНИХ ПРОЦЕСІВ**

**В. М. Євланов<sup>1</sup>, І. М. Вишневський<sup>2</sup>, С. І Азаров<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup> Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки  
НАН України, Київ*

*<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Чутливі конструктивні елементи датчиків контролю аварійних процесів АЕС є однією з найважливіших складових безпечної експлуатації АЕС. За допомогою них здійснюються забезпечення роботи реактора, функції його контролю і управління [1].

Проблема визначення зміни електрофізичних параметрів в чутливих і конструктивних матеріалах при імітації факторів впливу в лабораторних умовах вельми складна, оскільки важливо достовірно сформулювати вид фізичних впливів і агресивних середовищ, а також встановити кореляцію зміни метрологічних характеристик датчика при різних умовах експлуатації.

В літературі питання радіаційної стійкості чутливих і конструктивних елементів у відношенні їхніх електрофізичних властивостей, як для зворотних так і незворотних змін розроблені недостатньо. Частіше всього це уривкові відомості по радіаційній зміні електрофізичних властивостей в деяких конкретних матеріалах без аналізу причин, механізму і впливу різноманітних умов опромінювання. Результати проведених радіаційних випробувань дають змогу лише судити про придатність конкретних матеріалів в заданих умовах експлуатації і мало що дають у відношенні направленої пошуку нових радіаційностійких елементів.

При досягненні мети підвищення надійності датчиків, які є елементами системи інформаційних і керуючих систем АЕС, необхідно поряд із впливом іонізуючого випромінювання враховувати вплив електромагнітних перешкод [2].

В інституті створений комплекс методів і засобів, що задовольняє метрологічним вимогам і дає змогу проводити реакторні випробування напівпровідникових діелектриків, сегнетокераміки, оптичних волокон та інших конструктивних елементів.

1. *ГОСТ 25804.4-83.* Аппаратура, приборы, устройства и оборудование систем управления технологическими процессами атомных электростанций. Общие конструктивно-технические требования.
2. *НП 306.2.202-2015* Вимоги з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних та керуючих систем, важливих для безпеки атомних станцій.

# СТАН КВАЛІФІКАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ АЕС УКРАЇНИ І ШЛЯХИ ПОДАЛЬШОГО ПРОГРЕСУ ЦИХ РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Т. В. Ковалінська, І. А. Остапенко, В. І. Сахно**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Однією з програм забезпечення необхідного рівня безпеки ядерних енергоустановок при продовженні терміну експлуатації діючих енергоблоків є кваліфікація обладнання. Згідно з існуючими нормативними документами [1], у результаті оцінки поточного рівня кваліфікації для обладнання АЕС встановлюється кваліфікаційний термін – гарантія безпеки АЕС протягом цього періоду часу.

В доповіді викладено результати аналізу поточного стану кваліфікації обладнання АЕС України та визначено перспективи розвитку новітніх радіаційних технологій для випробування критичних вузлів і елементів систем, важливих для безпеки АЕС.

Показано, що на даний момент в основному вирішено питання введення в користування новітніх технологій експлуатації АЕС в частині впровадження заходів по кваліфікації найбільш важливого обладнання ядерних енергетичних установок.

Аналізуються схеми впроваджених технологій кваліфікаційних випробувань та особливості здійснення їх на сучасному етапі експлуатації АЕС [2]. При проведенні кваліфікаційних випробувань обладнання АЕС необхідно забезпечувати відповідність умов випробувань реальним умовам експлуатації обладнання в місці його розташування. З аналізу проектних аварій визначено склад ізотопів, які виходять під ГО в разі максимальної проектної аварії. Таким чином, ясно, що для проведення кваліфікаційних випробувань необхідно створити змішане (у відповідних співвідношеннях)  $\beta$ -,  $\gamma$ -поле. Запропоновано методику формування такого поля в реакційній камері радіаційної установки ІЯД з лінійним прискорювачем електронів. Дослідження показали, що використання конверсійних мішеней з різними коефіцієнтами затінення дає змогу оперативно змінювати співвідношення  $\beta$ -,  $\gamma$ -складових поля. Однак постають проблеми технологічної дозиметрії процесів при формуванні таких радіаційних умов випробування. Для вирішення проблем дозиметрії було удосконалено штатну систему сканування і технологічної дозиметрії.

Також у доповіді обґрунтовуються шляхи подальшого удосконалення технології контролю за станом обладнання АЕС та перспективні шляхи реалізації сучасних шляхів покращення структурної безпеки ядерних енергетичних об'єктів шляхом впровадження сучасної ідеології управління цими екологічно відповідальними джерелами енергії на основі введення постійного контролю за ресурсними показниками його складових.

1. ПМ-Д.0.03.476-09 «Программа работ по квалификации оборудования энергоблоков АЭС ГП НАЭК «Энергоатом».

2. Сахно О.В. Дослідження і розробка методів і технічних засобів радіаційних випробувань обладнання АЕС на електрофізичних установках: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ІЯД НАН України. - К., 2008. - 15 с.

## **ВИКОРИСТАННЯ АЛЬФА-АКТИВНОСТІ РАДІАТОРА КАМЕРИ ПОДІЛУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ НЕЙТРОННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ**

**О. А. Кучмагра, Г. І. Одинокін, А. С. Садовніков,  
С. М. Стадник, А. Д. Скорбун**

*Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України,  
Чорнобиль*

Розглянуто проблему перевірки працездатності вимірювального каналу (включаючи детектор) систем контролю нейтронних потоків. У деяких випадках, включаючи системи контролю нейтронних потоків на об'єкті «Укриття» ЧАЕС, детектори (іонізаційні камери) в результаті експлуатації виявляються радіоактивно забрудненими і практично неможливо організувати перевірку їхньої працездатності стандартним способом у лабораторії. У системах контролю нейтронного потоку, де використовуються камери поділу, в даний час використовується тільки тест-генератор. У цьому випадку перевіряється тільки електроніка вимірювального каналу, а працездатність камери поділу не може бути перевірена.

У даній роботі досліджено можливість використання, у якості тестового сигналу для перевірки камери поділу КНТ-31-1, імпульсів від альфа-розпаду радіатора з  $^{234}\text{U}$ , який знаходиться всередині камери. У зв'язку з великим періодом напіврозпаду  $^{234}\text{U}$  імпульси від цих альфа-частинок повинні давати стабільний фоновий сигнал.

На основі аналізу амплітудних характеристик сигналів з камери показано, що шляхом такого аналізу можна відділити сигнал альфа-фону від нейтронних імпульсів і від шумів електроніки.

Досліджено амплітудні, статистичні характеристики та межі довготривалої нестабільності (флуктуацій) альфа-струму.

Показано можливість створення методики перевірки нейтронного вимірювального каналу на основі контролю альфа-струму камер поділу, які входять до складу цього вимірювального каналу, в умовах постійного нейтронного навантаження, тобто не в лабораторних, а у виробничих умовах, без дістання детектора з місця його розташування.

## РЕАКТОРИ НА ХВИЛІ ЯДЕРНИХ ПОДІЛІВ. ДОСЯГНЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ

**В. М. Павлович**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

1. Короткий історичний огляд.
2. Теоретичні моделі, наближення, умови існування хвилі, зворотні зв'язки, стійкість хвилі.
3. Чисельні розрахунки – реакторні коди.
4. Переваги хвильових реакторів і проблеми.
5. Перспективи використання.

## МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТВЭЛОВ ВВЭР С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ТВС

**С. Н. Пелых, М. В. Максимов**

*Одесский национальный политехнический университет, Одесса*

Разработан метод прогнозирования разгерметизации оболочек ТВЭЛов ВВЭР-1000 по механизму накопления параметра деформационной поврежденности оболочек  $\omega(\tau)$ , учитывающий историю нагружения и распределение  $\omega(\tau)$  среди ТВЭЛов каждой ТВС [1].

При четырехгрупповой модели распределения  $\omega(\tau)$  максимальная величина  $\omega(\tau)$ , достигаемая в четырехлетнем топливном цикле, для алгоритмов перестановок ТВС А и Б увеличилась по сравнению с одnogрупповой моделью в 2,2 и 1,6 раз, соответственно. Для перестановки 3-22-54-29 алгоритма А превышает предельно допустимая величина деформационной поврежденности  $\omega^{\text{lim}} = 10\%$ . Полагая наличие в АКЗ шести тождественных секторов симметрии, общее количество разгерметизированных оболочек при реализации алгоритма А составит 1032, что превысит предел безопасной эксплуатации.

Несмотря на то, что для перестановки 3-22-54-29 достигается превышение  $\omega^{\text{lim}} = 10\%$ , превышения предельно допустимых величин для тангенциально-го и эквивалентного напряжений в оболочке не происходит. Этот вывод противоречит общепринятому мнению, что величина деформационной поврежденности не играет существенной ограничивающей роли при оценке предельного состояния оболочки ТВЭЛа.

Предложены метод учета неопределенности входных параметров модели расчета  $\omega(\tau)$ , при прогнозировании разгерметизации ТВЭЛов ВВЭР с учетом распределения энерговыделения среди ТВЭЛов ТВС, а также условие допустимости алгоритма перестановок ТВС и критерий минимальности вероятнос-

ти разгерметизации ТВЭЛов по механизму накопления  $\omega(\tau)$ , которые можно использовать в автоматизированной системе обеспечения герметичности оболочек ТВЭЛов при эксплуатации реактора типа ВВЭР [2].

1. Pelykh S.N. et al. // Annals of Nucl. En. - 2013. - Iss. 58. - P. 188.
2. Pelykh S.N. et al. // Problems of Atom. Sci. and Technol. - 2014. - Iss. 4. - P. 108.

## **ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ АКТИВНОЇ ЗОНИ ВВЕР-1000 НА ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ ДПЗ**

**Ю. Ф. Піонтковський<sup>1</sup>, В. І. Борисенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ*

Для безпечної експлуатації ядерно-енергетичної установки (ЯЕУ) потрібно постійно контролювати розподіл нейтронного потоку для визначення енерговиділення по активній зоні реактора. Контроль енерговиділення здійснюються за допомогою детекторів прямого заряду (ДПЗ), які входять до системи внутрішньо реакторного контролю (СВРК) [1]. Щоб правильно інтерпретувати сигнал детектора потрібно розуміти, який вклад тепловиділяючі елементи (ТВЕЛ) тепловиділяючих збірок (ТВЗ) вносять в сигнал ДПЗ. Також необхідно знати як залежить сигнал детектора від фізичних параметрів активної зони реактора (тиск, температура, концентрація поглиначів тощо).

В роботі представлено результати числового моделювання «робочого» елементу активної зони в MCNP.4C, внеску кожного тепловиділяючого елементу з 2-ох ТВЗ (сектор симетрії 60 °) у сигнал ДПЗ, а також представлено розподіл по висоті внеску кожного ТВЕЛУ в сигнал ДПЗ.

Показано, що найбільший внесок (~ 68 %) до сигналу ДПЗ зумовлюють ТВЕЛІ перших 6-ти рядів з ТВЗ, у центральному каналі якої розташовано ДПЗ. «Вага» сусідньої ТВЗ, щодо її внеску в сигнал ДПЗ виявилася набагато меншою (~ 8 %). В алгоритмах відновлення енергорозподілу по об'єму активної зони за сигналами ДПЗ сучасних СВРК ВВЕР-1000 враховується внесок тільки 6-ти ТВЕЛІв, оточуючих центральну трубку ТВЗ [2].

Також в роботі продемонстровано, що ДПЗ є «чутливим» до зони ТВЗ з висотою ~750 мм, що знаходиться безпосередньо навпроти детектора. Встановлено, що зі збільшенням концентрації борної кислоти в теплоносії ДПЗ стає менш чутливим до периферійних ТВЕЛІв ТВЗ, тоді як зміна температури теплоносія за висотою, як фактор впливу, вносить менш помітний внесок у формування сигналу ДПЗ у порівнянні з іншим фактором - концентрацією борної кислоти у теплоносії. Результати роботи будуть використані для розробки перспективних СВРК ВВЕР-1000.



1. Брагин В.А., Батенин И.В., Голованов М.Н. Системы внутриреакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 128 с.
2. Курченков А.Ю. Переходные функции, используемые при восстановлении и контроле энерговыделения реакторных установок водо-водяного типа. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. - Москва, 2013.

## **НОРМАТИВНІ АСПЕКТИ МАТЕРІАЛОЗНАВЧОГО СУПРОВОДУ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОРПУСІВ РЕАКТОРІВ ВВЕР-1000**

**В. М. Ревка, Л. І. Чирко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Матеріалознавчий супровід є важливою складовою безпечної експлуатації корпусів ядерних реакторів АЕС України. У рамках цього супроводу періодично проводять дослідження зразків-свідків, що регламентовано нормативними документами, які діють в атомній енергетиці України.

Зразки-свідки виготовлені з таких же матеріалів та опромінюються в таких же умовах, що і корпус реактора, який знаходиться в експлуатації. Таким чином, визначаючи зміни в механічних властивостях на підставі результатів випробувань зразків-свідків, оцінюють ступінь деградації матеріалів корпусів реакторів внаслідок впливу експлуатаційних факторів (в основному опромінення та температури). В даному випадку деградація матеріалів характеризується зсувом критичної температури крихкості (радіаційним окрихчуванням).

Визначення критичної температури крихкості матеріалів з необхідним рівнем консерватизму є ключовим моментом для оцінки терміну безпечної експлуатації корпусів реакторів і повинно регламентуватися відповідними нормативними документами. На даний час в Україні використовують нормативні підходи, які містять застарілі положення щодо визначення ступеню радіаційного окрихчування та критичної температури крихкості.

У даній роботі проведено аналіз недоліків існуючих нормативних підходів та показано, що використання їх може призвести до штучного завищення критичної температури крихкості та, як наслідок, до невиправданого обмеження терміну експлуатації корпусів реакторів ВВЕР-1000.

Враховуючи набутий досвід та результати всебічного аналізу експериментальних даних зразків-свідків, було запропоновано сучасну методику визначення критичної температури крихкості металу корпусів реакторів.

З метою удосконалення нормативної бази атомної енергетики України було розроблено стандарт організації СОУ НАЕК 087:2015, який на даний час проходить процедуру узгодження з регулюючим органом.

## КРИТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЕРМИ

В. В. Рязанов

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

В [1] рассмотрены возможности перколяционного описания поведения нейтронов в ядерном реакторе. Основой такого описания могут служить различные разрабатываемые в настоящее время направления. Это и теория сложных сетей, и теория иерархических систем, и модели поведения систем на таких структурах, как деревья Кэйли, и различного рода описание лесных пожаров или распространения инфекции. Настоящая работа основана на подходе, предложенном в [2] для иерархических сетей.

Рассматривается критическое поведение системы нейтронов в реакторе, характеризующееся эффективной температурой. Как модель ядерно-нейтронных процессов в реакторе, вводится модель растущего дерева Кейли с тепловым шумом. В модели учитывается рост дерева. В каждый момент времени  $m$  нейтронов добавляются и один устраняется на границе. Под границей кластера понимаются нейтроны, образованные делением ядра и еще не вступившие в реакции. Количество активных нейтронов на границе кластера (цепочки деления), в которых может происходить перколяция, т.е. способных к делению ядер, растет линейно со временем, как  $N = (m - 1) t$  (что соответствует критическому состоянию). Учтена и зависящая от времени динамика. Каждый узел может перколировать в конце только один раз, а для вероятности нейтрону быть выбранным в качестве одного из перколирующих нейтронов получена убывающая функция времени.

Получено, что для эффективной температуры распределение силы связей (энергии нейтронов) следует распределению Ферми. Динамика асимптотически во времени повторяет и стабилизирует распределение. Распределение возраста нейтрона на границе описывается эффективной степенной зависимостью. Найдены перколяционный порог (критическая точка реактора) и средняя энергия роста. Исследованы статистические свойства решений и определены две статистические суммы, описывающие ансамбль растущих деревьев Кэйли, т.е. системы нейтронов в нашей модели.

Вводятся и определяются вероятность того, что активный нейтрон  $i$  (с энергией  $\epsilon_i$ ) будет расти в момент времени  $t$ , вероятность того, что нейтрон, родившийся во время  $t_i$ , все еще активен в момент времени  $t$ , распределение возраста  $\tau$  нейтронов. Решая самосогласованные уравнения, получаем распределение Ферми для энергии нейтронов. Распределение энергии на границе кластера стремится к стационарному пределу, определенному распределением Ферми с заданным химическим потенциалом. Динамическая эволюция сети переводит систему в стационарное состояние. Определены вероятность того, что нейтрон с энергией  $\epsilon$  будет расти и оставаться на поверхности, и

вероятность того, что нейтрон энергии  $\epsilon$  покидает поверхность, которая асимптотически во времени достигает стационарного предела независимо от конкретной эволюции сети. В случае перколяции (соответствующей критической точки в теории реакторов) получено явное выражение для статистической суммы в пределе нулевой температуры. Кластер в данный момент времени будет содержать нейтроны любого возраста на разных этапах своей эволюции. Определены соотношения для статической и динамической статистических сумм. Энтропия получена как сумма двух энтропий Шеннона: энтропии объема и энтропии поверхности.

1. *Рязанов В.В.* // Ядерна енергетика та доквілля. - 2015 - № 1 (5). С. 36.
2. *Vianconi G.* // Physical Review E. - 2002. - Vol. 66 (3). - P. 036116.

## **ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ РЕАКТИВНОСТІ ВВЕР-1000 В ПРОГРАМНОМУ КОДІ MCNP**

**М. М. Сапон<sup>1</sup>, В. І. Борисенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ*

Коефіцієнти реактивності є важливим показником безпеки ядерного реактора. До теперішнього часу експериментальне визначення коефіцієнтів реактивності проводиться тільки в період проведення фізичних експериментів після перевантаження палива. Тому для виконання вимог НТД [1] про оснащення реакторної установки засобами, що забезпечують при експлуатації оперативне автоматизоване визначення коефіцієнтів реактивності протягом паливної кампанії, необхідна розробка сучасних методів визначення коефіцієнтів реактивності, які можуть застосовуватися при роботі реактора на потужності. Також важливе значення має розрахунок коефіцієнтів реактивності з використанням сучасних програмних засобів. У даній роботі представлені результати розрахунку в програмному коді MCNP [2] коефіцієнта реактивності по температурі теплоносія при різних значеннях концентрації борної кислоти в теплоносії 1 контуру.

Були створені MCNP моделі частин реакторного простору: тепловиділяюча збірка (ТВЗ), стінки якої є відбивачем; або група ТВЗ оточених водним прошарком. Знайдено залежності коефіцієнта розмноження нейтронів  $k$  від температури (густини) теплоносія без борної кислоти. Результати отримані для різного збагачення палива. Наступним етапом було визначення залежності коефіцієнта розмноження нейтронів від концентрації борної кислоти в теплоносії 1-го контуру. Для моделювання використовувалось паливо зі збагаченням 2 та 4 % по  $^{235}\text{U}$ . Отримано результати для  $k$  при різних концентраціях  $\text{H}_3\text{BO}_3$  в теплоносії залежно від її густини (таблиця). Виконано порівняння з критичними значеннями борної кислоти для паливних загрузок

## Значення $k$ для збагачення 4% ( $\pm 0,3$ % для 95 % ймовірності)

| Густина<br>води,<br>кг/м <sup>3</sup> | Концентрація борної кислоти, г/кг |         |         |         |         |
|---------------------------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                       | 3                                 | 5       | 8       | 10      | 12      |
| 600                                   | 1,30098                           | 1,26899 | 1,22119 | 1,19259 | 1,16596 |
| 700                                   | 1,32109                           | 1,28004 | 1,22557 | 1,19336 | 1,16084 |
| 800                                   | 1,33176                           | 1,28371 | 1,22418 | 1,18727 | 1,15124 |

ВВЕР-1000, а також проведений аналіз «особливостей» визначення коефіцієнта реактивності по температурі теплоносія для перших паливних кампаній ВВЕР-1000.

1. *Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском.* НП 306.2.145-2008.
2. *Briesmeister J.F.*, Ed. MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. - LA-13709-M (April 2000).

## СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ШУМІВ РЕАКТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ГІПЕРВИПАДКОВИХ ЯВИЩ ТА КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ

**А. Д. Скорбун<sup>1</sup>, С. М. Стадник<sup>1</sup>, В. Г. Котеленець<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України,  
Чорнобиль*

<sup>2</sup> *Відокремлений підрозділ «Южно-Українська АЕС»  
Державного підприємства «НАЕК «Енергоатом», Южноукраїнськ*

Проаналізовано статистичні властивості довгих часових рядів даних, які отримуються у процесі безперервного контролю за станом обладнання атомної станції. У даному випадку було проведено збір та обробку результатів вимірювання тиску живильної води до парогенератора, перепад тиску теплоносія на головному циркуляційному насосі 1, рівень котлової води в парогенераторі 1, рівень теплоносія в компенсаторі тиску. З використанням гіперстатистичного аналізу довгих рядів показано, що ці дані мають явно виражені ознаки відсутності статистичної стійкості (точність оцінок не зростає з ростом величини вибірки), що потребує перегляду підходів до аналізу таких даних. Гіперстатистика дає змогу відрізнити ряди даних, отриманих в холодних та гарячих гілках. Використання графічного кореляційного аналізу виявило деякі залежності між відповідними параметрами.

## АНАЛІЗ РІЗНИХ ПІДХОДІВ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЗСУВУ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ ДЛЯ МЕТАЛІВ КР ВВЕР-1000

**О. В. Тригубенко, В. М. Ревка, Ю. В. Чайковський, Л. І. Чирко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Основним методом визначення ступеню радіаційного окрихчування металу корпусів реакторів (КР) в Україні є випробування стандартних зразків Шарпі на ударну в'язкість. Даний метод є непрямим методом оцінки вязкості руйнування матеріалів корпусу. Серед прямих стандартизованих методів визначення в'язкості руйнування феритних сталей найпоширенішим є методика Майстер кривої (МК), яка поки що не прийнята в якості нормативного підходу у нашій країні. Тим не менше, штатна Програма зразків-свідків [1] для АЕС України передбачає опромінення в активній зоні реактора зразків для обох типів випробувань. Це дає можливість оцінити зсув критичної температури крихкості (КТК) двома різними способами і порівняти обидва підходи, враховуючи відмінності умов, за яких проводяться випробування зразків, а також особливості визначення КТК при випробуваннях на ударний вигин.

Тому у даній роботі виконано порівняння зсувів КТК, визначених за методикою МК та при випробуваннях на ударний вигин, змінюючи при цьому підходи до визначення критеріального рівня для кривої Шарпі. Окрім того, для багатьох комплектів зразків-свідків (ЗС) було накопичено значний флюенс нейтронів, що підвищує інтерес до такого порівняння.

В роботі використано три способи визначення критеріального рівня кривої Шарпі для оцінки температури крихко-в'язкого переходу і її зсуву внаслідок опромінення: за методикою, наведеною у ПНАЕ Г-7-002-86 [2] і прийнятою в якості базової при аналізі результатів випробувань зразків-свідків на ударний вигин; застосування фіксованого критеріального рівня у 28 Дж або для зразків типу Шарпі 35 Дж/см<sup>2</sup>; спосіб поступової зміни критеріального рівня енергії руйнування в залежності від пониження верхнього шельфу кривої Шарпі.

Дане дослідження проводилося на експериментальному обладнанні лабораторії «гарячих» камер ІЯД. Для аналізу було відібрано результати випробувань ЗС металу зварних швів КР ВВЕР-1000 у діапазоні накопиченого флюенса  $(18476) \cdot 10^{22}$  нейтр./м<sup>2</sup>. Зразки опромінювалися в реакторі при температурі  $\sim 300$  °С.

За результатами дослідження було виявлено, що практично у всіх випадках зсув КТК, визначений за методикою МК ( $\Delta T_0$ ) більший у порівнянні з результатами випробувань на ударний вигин ( $\Delta T_F$ ). Проте слід відмітити, що хоча експериментальні точки лежать нижче апроксимуючої прямої 1:1, вони розташовані паралельно їй, що вказує на можливість введення сталої поправки ( $\delta$ ) для коригування зсуву  $\Delta T_F$  по відношенню до  $\Delta T_0$ .

Таким чином, в результаті аналізу всіх підходів було запропоновано оптимальний метод визначення  $\Delta T_F$ , який враховує емпіричну поправку у  $10^\circ\text{C}$ , і більш надійно характеризує окрихчування металу корпусу реактора.

1. *Типовая программа* контроля свойств металла корпусов реакторов ВВЭР-1000 по образцам-свидетелям ПМ-Т.0.03.120-08. - ГП НАЭК «Энергоатом», 2008. - 36 с.
2. *ПНАЭ Г-7-002-86* Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Введ. 01.07.87. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 524 с.

## **ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА РИСКА ОТКАЗА ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ**

**А. Н. Харабет, О. Е. Зотеев, О. А. Чулкин, В. О. Зотеев**

*Одесский национальный политехнический университет, Одесса*

Современные газотурбинные силовые установки (ГТУ) нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. В ряде случаев они должны работать безотказно в течение длительного времени. В, частности, в мореплавании силовая ГТУ должна гарантированно обеспечивать сохранение хода судна при любых обстоятельствах или погодных условиях.

В работе были рассмотрены проблемы, которые относятся к оценке текущей надежности силовой газотурбинной установки экспертными методами и, как следствие, определению степени риска, сопровождающего допуск судна к рейсу.

Задачи, связанные с оценкой надежности и сопряженного с ней риска аварии являются, по своей сути, типичными задачами прогнозирования. Прогнозирование состояния большой системы всегда предполагает наличие у объекта эксплуатации неопределенности в работе различных подсистем. Выбор метода исследования такой системы, следовательно, сводится к тому, какой из современных аппаратов раскрытия неопределенностей будет принят.

Мы, считаем, что методы, разработанные Л. А. Заде, И. Мамдани и Б. Коско в подобных ситуациях эффективнее и надежнее других.

Для выполнения поставленной задачи – экспертного оценки текущей надежности и прогнозирования отказов целесообразно выделить условные подсистемы, которые обслуживают систему «воздушный компрессор - газовая турбина - генератор (общий приводной вал)» силовой установки. Такими подсистемами в данном случае могут быть:

- подсистема динамики совмещенного ротора в составе «компрессор - ГТУ - вал»;
- подсистема динамики газового вихревого потока, испытывающего сжатие и расширение;

- підсистема підготовки, подачі и воспламенения топлива;
- підсистема забезпечення ГТУ смазочним маслом;
- підсистема підготовки и подачі воздуха в камеру сгорания;
- підсистема промывки и продувки проточной части;
- підсистема пуска ГТУ из холодного состояния;
- підсистема подавления возгораний топлива вне камеры сгорания.

Для последующего переходу к композиції нечіткої моделі оцінки ризику на вході застосовані 4 лінгвістическіє змінні (ЛП), на виході - одна ЛП - іскомая оцінка ризику. Якщо ввести в модель текущіє значення входних змінних, то в результаті дії алгоритму FIS на виході буде отримана оцінка значення ризику.

## **ПОРІВНЯННЯ МОНТЕ КАРЛО МОДЕЛЮВАННЯ І ОДНОГРУПОВОЇ ДИФУЗІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ХВИЛІ ЯДЕРНИХ ПОДІЛІВ**

**В. М. Хотяїнцев<sup>1</sup>, О. М. Хотяїнцева<sup>2</sup>, В. І. Гулік<sup>2</sup>, В. М. Павлович<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Швидкий саморегульований реактор на хвилі ядерних поділів (РХЯП) – це інноваційний реактор, паливом для якого може служити збіднений або природний уран. За принципом роботи РХЯП відрізняється від традиційних реакторів: у режимі стаціонарної хвилі розподіли потоку нейтронів і концентрації ядер не змінюють з часом своєї форми, а переміщуються вздовж осі реактора зі сталою швидкістю.

У даній роботі швидкісна характеристика РХЯП (залежність швидкості хвилі від ефективної концентрації поглиначів у режимі стаціонарної хвилі) досліджувалась за допомогою Монте Карло коду Serpent. Як показано нами раніше в однієї груповій дифузійній моделі, вигляд швидкісної характеристики можна вивчати за залежністю реактивності від потужності реактора. Саме остання залежність розраховувалась кодом Serpent. Активна зона (початковий склад:  $^{238}\text{U}$  – 82 %, природне залізо – 15 %, натрій – 3 %) у вигляді циліндра з радіусом 0.89 м і довжиною 5 м була розділена у напрямку осі на 50 зон по 10 см. Перша зона – зона запалу – містила збагачене паливо. Розрахована за допомогою Монте Карло моделювання швидкісна характеристика є двозначною і добре узгоджується з теоретичними результатами в однієї груповій дифузійній моделі.

За отриманим кодом Serpent розподілом концентрацій нуклідів і потоку нейтронів по зонах у роботі визначені оптимальні однієї групові перерізи поглинання і поділу нуклідів із ланцюжка перетворень  $^{238}\text{U}$ . Для цього був розроблений спеціальний алгоритм, оснований на однієї груповій теорії стаціонарної хвилі. З отриманими таким чином однієї груповими перерізами стаціонарна хвиля була заново розрахована у дифузійній моделі для реактора даного

складу. Порівняння основних параметрів хвилі (глибини вигорання палива, кінцевого флюенса) і параметрів швидкісної характеристики з відповідними результатами Монте-Карло моделювання показує, що дифузійна модель, навіть у найпростішому одноруповому наближенні, описує стаціонарну хвилю ядерних поділів з прийнятною точністю.

## **РІВНЯННЯ ДИНАМІКИ РЕАКТОРА З УПОВІЛЬНЮЮЧИМ ВПЛИВОМ ЗАПІЗНЮВАЛЬНИХ НЕЙТРОНІВ**

**В. М. Хотяйнецв, А. В. Аксьонов**

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

На відміну від традиційних реакторів, в яких втрата реактивності зумовлює постійне втручання системи регулювання, новітні реактори типу «breed-and-burn», зокрема реактор на хвилі ядерних поділів, можуть працювати у саморегульованих режимах протягом значно довших часів, аніж період реактора. Тому крім процесів на швидких нейтронах, динаміка реактора має описувати значно повільніші процеси тривалістю у години, дні, роки, або й десятки років, а діапазон характерних часів системи розширюється до 14-15 порядків величини.

У роботі з єдиних позицій розглянуті відомі й нові задачі динаміки реакторів із запізнювальними нейтронами, коли реактивність повільно змінюється з часом за довільним законом. В основі підходу лежить розроблений нами метод послідовних наближень за малими параметрами, що відображають ієрархію часів у системі. Метод розроблений на основі математичного методу Васильєвої знаходження розв'язків задачі Коші сингулярних систем диференціальних рівнянь з малим параметром у вигляді асимптотичних рядів. На відміну від підходу Васильєвої, у роботі виділяються нормальні координати, що відповідають швидким і повільним змінним, а швидкі процеси послідовно виключаються із явного описання. У результаті отримані ефективні рівняння для повільних процесів, які неявно враховують вплив запізнювальних нейтронів. Сформульовані також критерії застосовності отриманих наближених рівнянь, виходячи з аналізу поправок за малими параметрами.

Отримані рівняння для повільної зміни потоку нейтронів для моделей точкової кінетики реактора з однією і двома групами запізнювальних нейтронів. Також показано, що точкове наближення не є обов'язковим для запропонованого методу; отримано просторово-часове рівняння дифузії нейтронів з урахуванням уповільнення динаміки потоку за рахунок запізнювальних нейтронів. Останнє рівняння можна використовувати як для аналітичного аналізу, так і для чисельного моделювання процесів динаміки в ядерних реакторах, зокрема у реакторі на хвилі ядерних поділів.



## ВИКОРИСТАННЯ НОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ INSTRON ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

**Ю. В. Чайковський, В. М. Ревка, Л. І. Чирко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

У зв'язку з тим, що для визначення механічних властивостей конструкційних матеріалів атомних енергетичних установок використовуються сучасні стандарти та методи, з'явилась необхідність у новому обладнанні, яке дасть можливість отримувати результати експериментів на порядок вищого рівні. Таким чином був придбаний новий універсальний комплекс INSTRON, який дав змогу проводити експерименти на тріщиностійкість (треточковий вигин та позацентровий розтяг) і на розтяг. В захисних камерах було демонтовано старе обладнання і встановлено випробувальну машину INSTRON 8862. Разом з новим устаткуванням було придбано програмне забезпечення Bluehill для управління процесом експерименту, обрахунку даних та виводу протоколів випробувань з результатами. Застосування датчика розкриття тріщини та реєстрація цих показників в цифровому вигляді дає нові можливості в проведенні більш широкого кола випробувань та точності вимірювань величин які визначаються.

Машина 8862 представляє собою систему з повністю цифровим управлінням, має підвищені якості реагування, понижений рівень шуму, за допомогою зворотного зв'язку і адаптер-контролю стежить за системами управління і високоточними системами вимірювання. Такі системи управління дають змогу прикладати надточне зусилля або ж здійснювати необхідну деформацію з високоточним вимірюванням отриманого ефекту. Універсальна шина обміну даними дає змогу підключити комп'ютер для автоматичного керування і збирання даних під час випробування. Комп'ютер дає змогу зберігати дані про попередні випробування, а також може використовуватися для генерування випадкових або заздалегідь запрограмованих форм керуючого сигналу. Пакет програмного забезпечення Instron Bluehill був розроблений спеціально для того, щоб покривати всі аспекти випробувань матеріалів.

Система дає змогу виконувати такі функції:

- Циклічний, прямокутна і трапецієвидна форми керуючого сигналу.
- Управління і спостереження за положенням, навантаженням і деформацією.
- Зміна діапазонів автоматично або вручну.
- Автоматичне або ручне калібрування датчиків.
- Компенсація нуля.
- Встановлення мінімальних і максимальних меж по окремих каналах і дій при їх досягненні.
- Відображення екрану вибору мови.

- Налаштування контуру керування в автоматичному або ручному режимі.
- Захист від перевантажень.
- Зберігання даних.
- Управління за допомогою комп'ютера.
- Аналогові результати для спостереження за випробуванням.
- Цифрові вхідні дані й результати.
- Постійне керування амплітудою.
- Запити про стан системи.
- Збереження і відновлення налаштувань випробувань і калібрувань.

## **СТВОРЕННЯ АЛГОРИТМУ ТА НАПИСАННЯ ПРОГРАМИ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЗСУВУ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКО-В'ЯЗКОГО ПЕРЕХОДУ ТА КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ ВІД ФЛЮЕНСА**

**О. В. Шкапяк, Л. І. Чирко, В. М. Ревка, Ю. В. Чайковський**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Метою представленої роботи є аналіз підходу ПНАЕ Г-7-002-86, VERLIFE-2013 і Типової програми ПМ-Т.0.03.120-08 до побудови залежностей зсуву температури крихко-в'язкого переходу та критичної температури крихкості від флюенса та побудова алгоритму для подальшого написання програми, яка в свою чергу буде автоматично видавати необхідні результати.

Відповідно до ПНАЕ Г-7-002-86 (глава 8, Додаток 2) величина  $\Delta T_F$  знаходиться за формулою:

$$\Delta T_F = T_{kF} - T_{KI}, \quad (1)$$

де  $\Delta T_F \geq 0$ ,  $T_{kF}$  – температура крихкості матеріалу внаслідок впливу опромінення при температурі експлуатації;  $T_{KI}$  – температура крихкості матеріалу у вихідному стані, отримана із результатів досліджень контрольного комплексу зразків-свідків.

Коефіцієнт радіаційного окрихченн  $A_F$  визначається по методу найменших квадратів із наступного співвідношення ПНАЕ Г-7-002-86:

$$\Delta T_F = A_F \cdot F^{1/3}, \quad (2)$$

де  $F$  – флюенс нейтронів в одиницях  $10^{22}$  нейтр/м<sup>2</sup>.

Згідно із Типовою програмою ПМ-Т.0.03.120-08 оцінка степені радіаційного окрихчення металу корпусу реактора повинна здійснюватися за 95 % верхньою огинаючою лінією регресії ( $A_F^{95\%}$ ) відповідних результатів досліджень зразків свідків. У VERLIFE-2013 пропонують середню лінію регресії зсувати вертикально вгору на величину  $\delta T$ .

Для побудови графіка критичної температури крихкості від флюенса необхідно до значення критичної температури крихкості в неопромінену стані (у паспорті корпусу реактора) додати значення  $\Delta T_F$  з верхньої огинаючої.

Відповідно до вищевикладеного було побудовано алгоритм, на основі якого розроблена програма, яка автоматично здійснює вищенаведені розрахунки. Достовірність розробленої програми була перевірена за допомогою порівняння розрахунків виконаних вручну та за допомогою розробленої програми.

У ході виконання роботи створено зручний в користуванні програмний продукт, що дав змогу зменшити часові витрати при побудові залежностей зсуву температури крихко-в'язкого переходу та критичної температури крихкості від флюенса, що в свою чергу відкриває нові можливості для швидкого обрахунку великої кількості однотипних даних з використанням різних методик, при подальшому удосконаленні алгоритму та тіла програми.

# Тези доповідей з радіаційної фізики та радіаційного матеріалознавства

## ЛАЗЕРНІ ПРИСКОРЮВАЧІ ПРОТОНІВ: ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ РАДІАЦІЙНОЇ ТЕРАПІЇ РАКУ (огляд)

І. Є. Анохін

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Історія використання заряджених адронів для терапії раку починається практично з відкриття циклотрона в 1932 р. Перше припущення, що протони можуть бути використані у радіобіології було зроблено в 1946 р. [1], а вже в 1954 р. протонна терапія була вперше застосована для лікування раку. У 2013 р. вже налічувалось 43 установки для адронної терапії, на яких пройшли лікування понад 96 000 хворих на рак [2]. Але висока вартість таких установок обмежує доступ широкого кола пацієнтів до протонної терапії та терапії за допомогою іонів  $C^{+6}$ .

Паралельно з розвитком традиційних прискорювачів, останні 20 років інтенсивно розвивається інший напрямок досліджень, який виріс з досліджень отримання плазми за допомогою надпотужних лазерів, а саме, використання надпотужних лазерів для отримання контрольованих протонних пучків [3 - 4]. Вважається, що такі лазери можуть бути використані в якості альтернативи РЧ прискорювачам для отримання пучків з відповідними характеристиками, які необхідні для лікування раку [5].

У запропонованому огляді розглядається прогрес, досягнутий у дослідженнях, які присвячені вивченню можливості використання лазерних прискорювачів для адронної терапії раку, а також основні завдання та виклики, які стоять перед дослідниками для отримання за допомогою лазерних прискорювачів контрольованих пучків протонів (іонів) з енергіями та іншими фізичними характеристиками, які необхідні в радіаційній медицині.

1. *Wilson R.R.* // Radiology. - 1946. - Vol. 47. - P. 487 - 491.
2. [http://en.wikipedia.org/wiki/Proton\\_therapy](http://en.wikipedia.org/wiki/Proton_therapy)
3. *Daido H., Nishiuchi M., Pirozhkov A.S.* // Rep. Prog. Phys. - 2012. - P. 75 - 71.
4. *Macchi A., Borghesi M., Passoni M.* // Rev. Mod. Phys. - 2013. - Vol. 85. - P. 751 - 798.
5. *Owena H., Lomax A., Jolly S.* // NIM. A. - 2015 (in press).

## СТРУКТУРНІ ЗМІНИ В КРЕМНІЮ, ОПРОМІНЕНОМУ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИМИ ДЕЙТРОНАМИ ТА ПРОТОНАМИ

**В. І. Варніна, Л. С. Марченко, М. Б. Пінковська,  
М. І. Старчик, Г. Г. Шматко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Струмені іонів газів застосовуються в нанотехнологіях напівпровідникових приладів для створення кристалічних шарів на аморфній матриці чи ізолювальних (аморфних) шарів у глибині кристалів. Крім цього іонне опромінення створює можливість отримувати в об'ємі матеріалу упорядковані структури з пор, які, будучи центрами релаксації в ґратці кристалу, знімають напруження стиснутого опроміненням приповерхневого шару, запобігають утворенню дислокацій, гетерують малі за вмістом небажані домішки.

З цих причин знання про поведінку дефектів у кремнію залежно від маси іонів, їхньої енергії та умов опромінення дають можливість їхнього контролю.

У роботі методами рентгенівської топографії, вибіркового протравлювання, металографії та багатокутової монохроматичної еліпсометрії досліджено структуру кремнію (вирощеного за методом Чохральського та зонного плавлення), бездислокаційного та з густиною дислокацій  $\sim 10^3 \text{ см}^{-2}$ . Зразки опромінено високоенергетичними протонами (6,8 MeV) та дейтронами (13,6 MeV) флюенсом  $\Phi = 10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-2}$  з різною густиною струменя. Пробіги протонів та дейтронів таких енергій становили 360 та 780 мкм, відповідно.

Порівнювалася структура кремнію в області пробігу іонів, їхнього гальмування та запробіжній області.

Виявилось, що ширина області гальмування іонів, де концентрація дефектів максимальна, після протравлювання у випадку дейтронного опромінення приблизно в 1,5 - 2 рази більша ніж протонного.

Ефект далекодії – виявлення ліній напружень на відстані розповсюдження дефектів на віддаль, що дорівнює подвійній довжині пробігу протонів (720 мкм) і паралельній лінії гальмування, за нашими методами спостерігався при струменях іонів  $0,25 \div 2 \text{ мкА}$ . Ефект не виявлено у випадку дейтронного опромінення дислокаційного кремнію.

Це може бути пов'язано зі збільшенням енергії та, відповідно, температури зразка в процесі дейтронного опромінення.

# ЗАЛЕЖНІСТЬ СПЕКТРІВ ЕКСИТОНІВ ВАНЬЄ ВІД ШИРИНИ БАР'ЄРНОГО ШАРУ ДЛЯ ЕЛЕКТРОНА В ЗОНІ ПРОВІДНОСТІ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ II ТИПУ

**Г. В. Верцімаха**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Для дослідження оптичних властивостей напівпровідникових гетероструктур важливим є розрахунок екситонних спектрів та хвильових функцій. Особливий інтерес викликають гетероструктури другого типу, такі як  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  або  $\text{ZnS}/\text{ZnSe}/\text{ZnS}$ , в яких у внутрішньому шарі гетероструктури утворюється потенціальна яма для дірки у валентній зоні і потенціальний бар'єр для електрона у зоні провідності. Таким чином, в подібних структурах збуджуються просторово непрямі дипольярні екситони, у яких електрон та дірка знаходяться в різних шарах структури. Такі структури, зокрема  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ , використовуються для вивчення колективних екситонних ефектів: дипольярні екситони, мають великий час життя, виникають без накладання зовнішнього електричного поля, мають багатий спектр станів, який можна змінювати, варіюючи ширину ями та концентрації сполук [1].

У подібних структурах дірка локалізована в квантовій ямі центрального шару структури, тоді як електрон локалізується в зовнішніх шарах лише завдяки кулонівській взаємодії з діркою. Ступінь локалізації хвильової функції електрона та ступінь її проникнення в бар'єрний шар істотно залежить від параметрів структури. У випадку широкого бар'єрного шару і сильного кулонівського притягання між носіями заряду дірка може зміститись від центра потенціальної ями до бар'єрного шару, біля якого локалізований електрон. Це відповідає утворенню екситону, в якому хвильова функція екситону несиметрична по відношенню до осі симетрії квантової ями.

У роботі розраховано енергію основного стану екситону в структурі II типу варіаційним методом з використанням двох пробних функцій, симетричної та несиметричної відносно осі симетрії квантової ями, для структур на основі кристалу  $\text{ZnO}$ . Як показують розрахунки, в достатньо широких ямах утворення несиметричного стану є енергетично вигідним, що може якісно змінити спектри екситону даної структури.

1. *Burbaev T.M., Bagaev V.S., Bobrik E.A. et al. // Thin Solid Films. - 2008. - Vol. 55. - P. 517.*

# ЕЛЕКТРОСТАТИЧНІ ПАСТКИ ДЛЯ НЕПРЯМИХ ЕКСИТОНІВ У ПОДВІЙНИХ КВАНТОВИХ ЯМАХ МІЖ ЕЛЕКТРОДАМИ СКІНЧЕННИХ РОЗМІРІВ

**Г. В. Верцімаха, І. Ю. Голіней**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Розраховано профілі потенціальної енергії екситонів у подвійних квантових ямах, поміщених в електростатичне поле між двома плоскими електродами, один з яких має скінченні розміри і, загалом, довільну форму. Дослідження екситонів у подвійних квантових ям викликає в останні роки значний інтерес завдяки яскравим нелінійним ефектам, що спостерігаються в таких системах при великій концентрації непрямих екситонів [1, 2]. Непрямі екситони виникають у цих структурах у сильних електричних полях, що змушують електрони й дірки локалізуватися в різних ямах. Неоднорідне електричне поле створює для екситонів області з меншою потенціальною енергією, куди вони будуть збиратися при опроміненні. При розділенні електрона й дірки в різні ями збільшується час життя екситона, що сприяє нагромадженню їх до високих концентрацій. У системах із електродами скінченних розмірів, зокрема в системах з електродами із вікнами, електростатичне поле виконує водночас функцію розділення електрона й дірки в різні ями й створення електростатичної пастки.

Для знаходження профілів енергії екситонів у площині подвійної квантової ями розв'язано як електростатичну задачу з визначення напруженості електричного поля у проміжку між електродами довільної форми, так і квантомеханічну задачу, що описує розділення електрона й дірки в залежності від напруженості поля. В областях, де напруженість електричного поля мала, екситони залишаються прямими, локалізованими в ширшій із квантових ям подвійної структури. В областях сильного електричного поля екситони стають непрямыми, зростає час їхнього життя, вони отримують значний дипольний момент.

Розрахунки, виконані для електродів різної форми, показали, що електростатичні пастки можуть утворюватися завдяки крайовим ефектам в області під краєм електродів або в областях сильних полів під суцільними електродами. Проаналізовано залежності профілів потенціальної енергії екситонів від положення подвійної квантової ями між електродами, від відстані між електродами тощо.

Результати роботи частково використовувалися для розв'язання задачі про утворення просторових структур в екситонній люмінесценції [3].

1. *Butov L.V., Gossard A.C., Chemla D.S. // Nature. - 2002. - Vol. 418. - P. 751.*
2. *Gorbunov A.V., Timofeev V.B. // JETP Lett. - 2006. - Vol. 146.*
3. *Tomylo V.V., Goliney I.Yu., Chernyuk A.A., Sugakov V.I. // Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur. - 2014. - Vol. 40.*

## ДОСЛІДЖЕННЯ *IN SITU* ЕФЕКТІВ ОПРОМІНЕННЯ В КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ

І. М. Вишневецький, Д. І. Чирко, В. М. Ревка

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Роль конструкційних матеріалів полягає в забезпеченні стабільності геометрії активної зони на весь період експлуатації. Практично всі радіаційні явища, що мають місце в конструкційних матеріалах при опроміненні приводять до деградації їхніх вихідних фізико-механічних властивостей. Для обґрунтованого прогнозу цих властивостей в кожному матеріалі необхідно знати механізми таких явищ як розпухання, повзучості, релаксації напружень. Для вирішення цих питань найбільш актуальними є дослідження безпосередньо в процесі реакторного опромінення, тобто в умовах перенасичення структури матеріалів точковими дефектами. Це така ситуація, яка ніколи не існує в звичайних умовах, але під опроміненням приводить до значних змін фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів.

До тепер відома порівняно невелика кількість робіт, проведених *in situ*. В більшості таких робіт встановлено, що вплив ядерного опромінення на складні процеси в металах і сплавах дуже різнобарвний. Для отримання однозначної інформації необхідно вивчати цей вплив на окремі параметри, які контролюють різні фазові і структурні перетворення. Таким параметрами є температури фазових перетворень, енергія активації процесів, що досліджуються, атомна рухливість, модуль пружності.

Проведення експериментів *in situ* дає можливість виявити механізми процесів, які приводять до макроефектів при тривалому опроміненні обладнання, зміни їхніх механічних параметрів і мікроструктури.

У 80-х – на початку 90-х років в Інституті ядерних досліджень НАН України були створені експериментальні внутрішньо-каналні установки для досліджень в потоці нейтронів дослідницького реактора ВВРМ.

Відповідно були виявлені нові ефекти, такі як ефект зворотного зменшення модулю пружності під час дії опромінення, прискорена опроміненням дифузія, радіаційна повзучість і релаксація напружень, також ефекти пов'язані з наявністю трансмутаційного гелію і водню, які утворюються в результаті ядерних реакцій.

Аналітичні розрахунки, основані на запропонованому механізмі, який пов'язує дислокаційну пружність з пересиченням матриці точковими дефектами, показали, що ефект спричиняється збільшенням дифузійної рухливості дислокацій за рахунок надлишкового притоку міжвузловинних атомів. Згаданий механізм дав можливість пояснити не тільки температурну залежність зміни модулю зсуву, але й вплив на неї густини потоку й флюенса нейтронів, який проявляється в температурному інтервалі  $(0,25 \div 0,4)T_{пл}$ , тобто в тому ж температурному інтервалі, що й вакансійне розпухання при опроміненні. Ви-



явлена кореляція дає змогу оцінювати радіаційну стійкість матеріалів без проведення довготривалих реакторних експериментів.

Створена в останні роки в ІЯД НАНУ науково-технологічна радіаційна установка з використанням прискорених електронів дає можливість проводити дослідження і технологічні експерименти щодо стійкості обладнання АЕС до опромінення (наприклад, ізоляційних матеріалів кабелів, тощо).

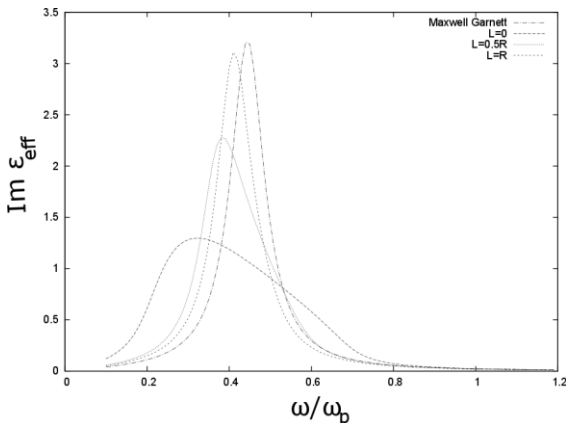
Актуальність і перспективність таких досліджень безперечна. Продовження їх обмежується фінансовим станом і технічними проблемами, пов'язаними з підтримкою визначеної температури в процесі опромінення.

## ТЕОРІЯ ЕФЕКТИВНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ ДІЕЛЕКТРИКА ЗІ СФЕРИЧНИМИ МЕТАЛЕВИМИ НАНОЧАСТИНКАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТРАНСФЕР-МАТРИЦЬ

І. Ю. Голіней

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Побудовано теорію ефективною діелектричною проникністю для дисперсних середовищ зі сферичними металевими наночастинками. Вивчення систем із металевими наночастинками набуло значної ваги в останні роки в зв'язку з використанням локалізованих плазмонів для підсилення комбінаційного розсіяння, поглинання світла та люмінесценції, що має великі перспективи для застосувань у різних областях фізики, хімії та біології. Звична теорія ефективного середовища за схемою Бруггемана неправильно описує діелектричні властивості дисперсних матеріалів з металевими наночастинками навіть при їхній малій концентрації на відміну від теорії Максвелла Гарнетта [1].



Діелектрична функція дисперсного середовища залежно від товщини проміжного шару.

Причиною є те, що в схемі Бруггемана поверхня розділу між металом та діелектриком замінюється поверхнею розділу між металом та ефективним середовищем, що призводить до неправильного опису поверхневих плазмонів, суттєвих для такої задачі. Для зняття цієї суперечності запропоновано використовувати в якості елементарного розсіювача металеву сферу із шаром ді-

електрика, що дає змогу зберігати правильні властивості границі розділу. Для математичного розв'язку задачі розсіяння електромагнітної хвилі на такому елементарному розсіювачі застосовано метод трансфер-матриць у сферичній геометрії. Проведено аналіз залежності ефективної діелектричної функції від товщини додатково шару й показано, що з її збільшенням оптичний спектр дисперсного середовища в схемі Бругемана наближається до спектру, розрахованого за теорією Максвелла Гарнетта.

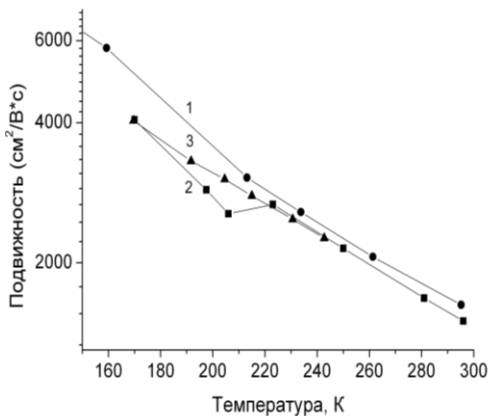
1. *Петров Ю.І.* Физика малых частиц. - М.: Наука, 1982.

## **РОЛЬ МЕЖУЗЕЛЬНЫХ АТОМОВ КРЕМНИЯ В КОНФИГУРАЦИОННОЙ ПЕРЕСТРОЙКЕ ДИВАКАНСИЙ В КЛАСТЕРАХ ДЕФЕКТОВ**

**А. П. Долголенко**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Известно, что быстрые нейтроны создают в кремнии кластеры дефектов наряду с точечными дефектами в проводящей матрице образцов. Перезарядка дефектов в кластерах приводит к дополнительному перекрытию областей пространственных зарядов кластеров дефектов. Это вызывает рост дрейфовых барьеров и уменьшение подвижности носителей с понижением температуры. Моливер [1] обосновал представление о двухъямном потенциале дивакансии в кремнии, в котором они являются доминирующими дефектами в кластерах и могут находиться в двух конфигурациях с большей и с меньшей дисторсией. Экспериментально показано, что дивакансии могут перестраиваться путем конфигурационного перехода из большей дисторсии в меньшую и обратно [2].



Температурные зависимости подвижности электронов в n-Si (З.П.), измеренные на образце с концентрацией носителей до облучения  $n_0 = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , облученном  $n^0$  флюенсом  $2,7 \cdot 10^{13} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ . Кривая 2 снята с понижением, а 3 с обратным повышением температуры.

Положение уровня Ферми в кластере дефектов определяется расположением в запрещенной зоне кремния нейтрального и отрицательно заряженного уровня дивакансии относительно дна зоны проводимости: в  $Q_1$  – конфигурации оно равно  $E_c - 0,5075$  эВ и  $E_c - 0,545$  эВ в  $Q_2$ -конфигурации с меньшей дисторсией. Можно предположить, что при понижении температуры междоузельные атомы кремния, которые создавали деформацию решетки около дивакансий, мигрировали из кластеров. Дивакансии изменили конфигурацию с большей на меньшую дисторсию. Теперь электроны из зоны проводимости уже не могут захватиться на  $E_c - 0,42$  эВ уровень дивакансии в  $Q_2$ -конфигурации и подвижность электронов будет возрасти. Повышение температуры на образце (кривая 3) показало отсутствие захвата электронов на уровень  $E_c - 0,425$  эВ дивакансии в  $Q_1$ -конфигурации.

Междоузельные атомы кремния с понижением температуры уменьшают энергию миграции в кремнии, что позволяет им или уйти на стоки или преодолев барьер провзаимодействовать с дивакансиями по реакции  $I_{Si} + V_2 > V$ .

1. *Моливер С.С.* Метод открытой оболочки для электронной структуры дивакансии кремния // ФТТ. – 1999. – Т. 41, № 3. – С. 404 - 410.
2. *Долголенко А.П.* Электронные уровни конфигураций дивакансий в кремнии // Вопросы атомной науки и техники. Серия: “Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение”. – 2012. – № 5(81). – С. 13 - 20.

## РОЗРОБКА НОВИХ РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ІНДУСТРІЇ

**Т. В. Ковалінська<sup>1</sup>, І. А. Остапенко<sup>1</sup>, В. І. Сахно<sup>1</sup>, А. Г. Зелінський<sup>1</sup>,  
Н. В. Халова<sup>1</sup>, А. М. Файнлейб<sup>2</sup>, І. Ю. Даниленко<sup>2</sup>, Ю. М. Колесник<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, Київ*

<sup>3</sup> *ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», Київ*

Викладено матеріали випробувань нових радіаційних технологій покращення характеристик промислових виробів шляхом радіаційно-хімічної модифікації їх. Нові розробки передбачають залучення радіації вже на завершальних етапах використання промислових виробів.

Ці технології відрізняються тим, що не вимагають радіаційної техніки на підприємствах-виробниках і суттєво спрощують процес впровадження їх в економіку України. Впровадження їх дозволить на існуючих підприємствах без їхньої реконструкції випускати бетонні вироби з підвищеними технічними показниками морозостійкості, гідрофобності, корозійної стійкості і міцності для застосування на об'єктах зі складними експлуатаційними умовами.

Використання нових технологій з таким рознесенням технологічним циклом буде особливо ефективним при виробництві критичних елементів для складних і дорогих ядерних енергетичних об'єктів, бо дає змогу подовжити міжремонтний період їхньої експлуатації. Новий матеріал, вироблений за даною технологією покращує економіку експлуатації потужних ядерних джерел енергії при одночасному зростанні надійності їх роботи.

## QUANTUM CHAOS AND LEVEL STATISTICS IN ELECTRON-PHONON SYSTEMS

**E. Majernikova<sup>1</sup>, S. Shpyrko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Physics, Slovakian Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia*

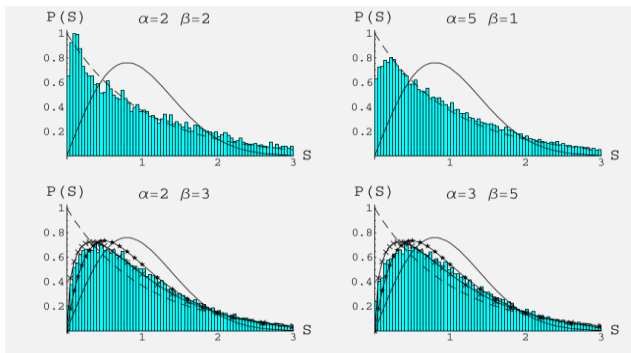
<sup>2</sup> *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

We study the statistics of the excited energy levels in a class of systems of electron-phonon interaction represented by the generalized two-level Jahn - Teller (JT)  $E x (b_1 + b_2)$  model with quantum Hamiltonian [1]

$$\hat{H} = (b_1^\dagger b_1 + b_2^\dagger b_2 + 1)I + \alpha(b_1^\dagger + b_1)\sigma_z - \beta(b_2^\dagger + b_2)\sigma_x,$$

( $b_i$  are phonon (boson) operators, and  $2 \times 2$  Pauli matrices  $\sigma_i$  account for two electron levels). Difference of coupling strengths  $\alpha\beta$  presents the generalization of the model compared to conventional JT systems with  $\alpha = \beta$ , e.g., by a spatial anisotropy of a crystal.

Nonequivalence of the phonon-electron coupling constants results in the symmetry lowering (violation of the rotation symmetry of the JT model) which is shown to have a dramatic impact on the statistics of energy levels and eigenfunctions with emerging non-conventional quantum chaotic patterns. In particular, the wavefunctions acquire multi-fractal properties and individual energy levels become extremely irregular.



Statistical distribution of nearest-neighbour spacings of levels in a generalized JT system. Lines show Wigner, Poisson and semi-Poisson distributions.

In spite of this the system acquires novel universalities on the level of statistical description, and these universalities appear to be irrelevant to the actual values of coupling strengths provided they differ enough one from another.

The distribution of nearest-neighbour level spacings in the domain of model parameters with mostly developed quantum chaos is shown to be close to the novel class of semi-Poisson distribution  $P(S) \sim 4S \exp(-2S)$  typical, e.g. for the M-I transition in the Anderson model [2]. The vicinity to this model is also supported by the long-range statistical measure  $\Delta(E)$  whose slope (spectral compressibility) appears to tend to the value (0.5/15) predicted for the said intermediate statistics [3]. Similar results emerge from the study of the fractal dimensions of the wavefunctions. The exposed results allow us to suggest that the class of investigated electron-phonon models pertains to a class of systems sharing a novel universal statistics one of whose representative is the Anderson model at the point of M-I transition.

1. *Majernikova E., Shpyrko S. // Phys. Rev. E. - 2006. - Vol. 73. - P. 066215; cond-mat/0509687*
2. *Majernikova E., Shpyrko S. // Phys. Rev. E. - 2006. - Vol. 73. - P. 057202; cond-mat/0510710*
3. *Majernikova E., Shpyrko S. // J. Phys. A. - 2008. - Vol. 41. - P. 155102; cond-mat/0611736*

## **АКУСТОСТИМУЛЬОВАНІ ПРОЦЕСИ РЕЛАКСАЦІЇ У ВИХІДНИХ ТА ОПРОМІНЕНИХ СВІТЛОДІОДАХ GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>**

**Є. В. Малий<sup>1</sup>, М. В. Литовченко<sup>1</sup>, Я. М. Оліх<sup>2</sup>,  
І. В. Петренко<sup>1</sup>, В. П. Тартачник<sup>1</sup>**

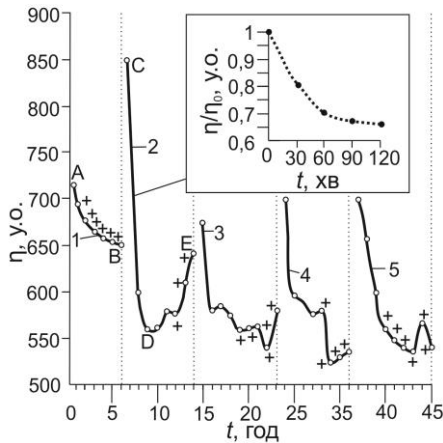
<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ*

Ультразвукова обробка (УЗО) промислових виробів різного призначення та напівпровідникових приладів – ефективний засіб неруйнівного впливу на фізичні властивості матеріалів з метою коригування їхніх характеристик у потрібному напрямку. При дослідженні дії ультразвуку (УЗ) на різні матеріали основну увагу, як правило, зосереджують на аналізі наслідків УЗО на властивості кристалів і приладів; питання механізмів взаємодії УЗ-хвилі з дефектами структури різних видів і з’ясування природи явищ, що спостерігаються при проходженні УЗ через зразок, торкаються досить побіжно.

Головною метою нашої роботи було виявлення особливостей впливу УЗ-хвилі на твердий розчин GaAs-GaP. Такий об’єкт характеризується вищим рівнем дефектності, порівняно з бінарними сполуками (GaP чи GaAs), що зумовлене нерегулярністю розподілу атомів As і P. Ультразвукова хвиля з

частотою  $\nu = 2,2$  МГц та потужністю  $W \approx 0,5$  Вт/см<sup>2</sup> вводилася у вихідні та опромінені електронами з  $E = 2$  МеВ кристали GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> у процесі пропускання крізь зразок струму  $I = 40$  мА.



Деградаційно-відновлювальні цикли GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>-світлодіода.

тривалої паузи ( $t = 12$  год), за якою розпочинається наступний цикл (2),  $\eta$  суттєво зростає і в підсумку перевищує початкове значення (т. С). Слід зазначити, що кожний наступний цикл супроводжується падінням інтенсивності випромінювання при протіканні струму через діод. Увімкнення УЗ зумовлює появу ділянки зростання яскравості діода, яка завершує кожний із деградаційно-релаксаційних циклів (ділянка D - E). Подібна тенденція із незначними відхиленнями властива подальшим циклам УЗО (3, 4, 5). Сумарний час для п'яти циклів ультразвукового навантаження не перевищує 24 год обробки, після чого інтенсивність випромінювання різко падає.

Наявність затяжних довготривалих релаксаційних процесів у кристалі є ознакою існування в ньому великомасштабних порушень структури та дифузійних процесів перебудови точкових дефектів. Ймовірно, що довготривала релаксація свічення попередньо підданого УЗО GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> зумовлена саме підграткою GaP, в якій стимульований УЗ-хвилею рух дислокацій є причиною виникнення дислокаційних сіток, відповідальних за формування «дефектів темних ліній» та «дефектів темних плям» з високою концентрацією безвипромінювальних центрів. Часткове зростання інтенсивності свічення на початкових циклах УЗО пов'язується з поглинанням безвипромінювальних центрів рухомими дислокаціями, активованими УЗ-хвилею.

Рисунок показує зміну інтенсивності свічення вихідного GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>-світлодіода протягом перших п'яти циклів УЗ навантаження («+» означає введення ультразвуку в зразок). На вставці – зміна величини ефективності випромінювання від часу інжекції неосновних носіїв заряду для 2-го деградаційно-відновлювального циклу. Впродовж 1-го циклу УЗО інтенсивність свічення зразка  $\eta$  спершу зменшується (A - B). Але після вимкнення джерела ультразвуку і

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОПРОМІНЕННЯ ЕЛЕКТРОНАМИ З ЕНЕРГІЄЮ 10 MeV НА ОПТИЧНІ ТА ЛЮМІНЕСЦЕНТНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ CaF<sub>2</sub>

**В. Маслюк, І. Мегела, Т. Вієру-Васіліца, І. Роман**

*Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород*

Зразки монокристалічного фториду кальцію опромінювались при кімнатній температурі прискореними на мікротроні М-30 електронами з енергією 10 MeV. Опромінення здійснювалось в розсіяному пучку інтенсивністю  $\approx 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  та в прямому пучку з інтенсивністю потоку  $\approx 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . В останньому випадку для підтримки кімнатної температури зразків під час опромінення забезпечувалось охолодження їх паровою рідкого азоту. Контроль температури зразків під час опромінення здійснювався дистанційною мідь-константановою термопарою.

Дослідження зміни кінетики довготривалої фосфоресценції при кімнатній температурі в залежності від дози та інтенсивності опромінення показало, що, на відміну від кристалів LiF та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в зразках CaF<sub>2</sub> спостерігається збільшення нахилу кривих кінетики фосфоресценції при збільшенні дози опромінення.

На кривих термолюмінесценції зразків, опромінених дозами до  $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , виділяються піки з максимумами при 125, 200 та 250 °С. В опромінених великими інтегральними потоками електронів ( $\geq 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) зразках CaF<sub>2</sub> спостерігається зміна співвідношень між піками термолюмінесценції, а їхні максимуми відповідають температурам 150, 200 та 250 °С.

В результаті опромінення дозами  $\leq 10^{16} \text{ см}^{-2}$  спостерігається додаткове оптичне поглинання з чітко вираженими смугами, яке збільшується при збільшенні дози опромінення. Проведений ізохронний відпал показав, що додаткове поглинання в кристалах CaF<sub>2</sub>, зумовлене опроміненням, усувається при нагріві зразків до 200 °С.

## **АНАЛІЗ ОТРИМАНОГО ДОСВІДУ, ПРОБЛЕМ ТА ШЛЯХІВ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ПРИКЛАДНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В СЕКТОРІ РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**В. І. Сахно<sup>1</sup>, Т. В. Ковалінська<sup>1</sup>, І. А. Остапенко<sup>1</sup>, А. Г. Зелінський<sup>1</sup>,  
Є. Г. Міхнєва<sup>1</sup>, Н. В. Халова<sup>1</sup>, О. А. Жернов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут гематології та трансфузіології НАМН України, Київ*

Обговорюється результати аналізу досвіду досліджень і розробок з найбільш значимих радіаційних технологій для різних галузей економіки, здій-

снені в СРТ. Аналіз охоплює матеріали прикладних досліджень з інтенсивними пучками заряджених частинок та принципи використання результатів цих наукових досліджень для створення нових методів виробництва в сільському господарстві, медицині, напівпровідниках. Досліджується економічне підґрунтя таких прикладних розробок, проблеми впровадження і розвитку їх.

Визначаються можливі шляхи подальшого розвитку таких досліджень і розробок з урахуванням проблем сьогодення та необхідністю існування в ринкових умовах. Показано, що основною задачею, яку необхідно оперативно вирішити для створення надійної основи подальших прикладних робіт є зміцнення технічної бази СРТ новою оригінальною технікою. Обґрунтовується перелік необхідної техніки, можливі шляхи її створення.

Аналізуються методологічні напрямки розробки новітніх радіаційних технологій з урахуванням сучасного рівня розвитку їх у світі. Обґрунтовано, що наступний етап прикладних наукових радіаційних досліджень повинен бути спрямований на активне вивчення тонких механізмів перебудови матерії під впливом іонізуючих випромінювань і застосування радіації в технологіях матеріалів з новими унікальними властивостями для медицини та промисловості.

## **СТРУКТУРА ТА ФОНОННІ СПЕКТРИ НАНОРОЗМІРНИХ ЧАСТИНОК ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ЦИРКОНІЮ**

**В. І. Слісєнко<sup>1</sup>, В. О. Зотєєв<sup>2</sup>, О. А. Василькевич<sup>1</sup>,  
О. Є. Зотєєв<sup>2</sup>, В. В. Кротєнко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ,*

<sup>2</sup> *Одеський національний політехнічний університет, Одеса*

Спільне вивчення структури і динаміки ґратки різних кристалічних систем дає змогу дослідити ряд специфічних питань фізики твердого тіла. Саме під час таких експериментів можна встановити природу різниці у спектрах коливань структурно-подібних сполук. У даній роботі представлені результати досліджень структури кристалічної ґратки та спектрів коливань нанорозмірних частинок (~20 нм) твердих розчинів на основі діоксиду цирконію методами нейтронної спектроскопії. У цих системах, де концентрація точкових дефектів досить велика, є підстави очікувати наявність різних типів упорядкування структурних елементів, що відбивається на властивостях коливань атомів.

Найбільша увага у дослідженнях була приділена системі  $ZrO_2-Y_2O_3$ , бо саме з нею пов'язана більшість суперечливих даних відносно упорядкування структурних елементів у кристалічній ґратці. Крім того були проведені експерименти з системами  $ZrO_2-Nd_2O_3$  та  $ZrO_2-CaO$ .

В одній із наших попередніх робіт викладені результати досліджень спектрів коливань твердих розчинів  $ZrO_2-Y_2O_3$  при концентрації оксиду ітрію 10



та 15 % мол. Є всі підстави допускати наявність у системах на основі діоксиду цирконію різних типів упорядкування структурних елементів, що повинно відображатися на їхніх фононних спектрах.

Структурні дослідження були проведені на нейтронному дифрактометрі KSN-2 ( $\lambda = 0,104$  нм) та рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2,0 (у випромінюванні  $K_{\alpha}Fe$ ,  $\lambda = 0,194$  нм). Спектри непружно розсіяних повільних нейтронів були отримані на багатодетекторному нейтронному спектрометрі за часом прольоту, розташованому на 1-ому горизонтальному каналі реактора ВВР-М ІЯД НАН України. Енергія падаючих на зразок нейтронів становила 25 МеВ. У даних експериментах вивчалися полікристалічні зразки, отримані по методу співсаджень гідрооксидів. Всі зразки підлягали стандартному гомогенізуючому відпалу протягом  $7,2 \cdot 10^5$  с при 720 К. Розмір частинок було визначено за допомогою мікроскопу BS-613.

За результатами експериментів можна зробити такі висновки:

1. Отримані дані про динаміку твердих розчинів на основі діоксиду цирконію показують, що із зростанням концентрації іонів-стабілізаторів границя спектра коливань атомів зміщується із 60 до 110 МеВ.

2. Проведеними експериментами встановлено, що структура типу пірохлору у твердих розчинах оксиду цирконію, стабілізованого оксидом ітрію у кількості 33 % мол., не існує.

## **УТВОРЕННЯ КОНДЕНСОВАНИХ ФАЗ ЕКСИТОНІВ ПІД ДІЄЮ ПРОСТОРОВО-МОДУЛЬОВАНОГО ЛАЗЕРНОГО ОПРОМІНЕННЯ**

**В. Й. Сугаков<sup>1</sup>, В. В. Томилко<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

У доповіді представлено результати дослідження конденсації екситонів у подвійних квантових ямах напівпровідників під дією лазерного опромінення. Дослідження є актуальним як з фундаментальної (встановлення характеру міжекситонної взаємодії), так і прикладної (побудова екситонних оптоелектронних приладів) точки зору. Напівпровідникові системи з квантовими ямами є цікавим об'єктом експериментального дослідження, оскільки непрямі екситони мають великий час життя. Дана особливість непрямих екситонів дає можливість вивчати колективні ефекти взаємодії в таких системах. Так, в роботі [1] фотозбудження непрямих екситонів здійснювалось через вікна різної просторової геометрії в верхньому металевому електроді. Спостерігається утворення просторової структури еквідистантно розташованих плям випромінювання вздовж периметра вікон. Саме поясненню цих експериментів присвячена дана робота.

Для розрахунку розподілу густини екситонів використовується феноменологічна модель Ландау фазових переходів, узагальнена для випадку скін-

ченного часу життя екситонів. У моделі припускається існування конденсованої фази екситонів внаслідок притягання між ними на певних відстанях. У рамках такого підходу вдалося пояснити низку дослідів (див. посилання в роботі [2]). У роботі [3] досліджувався розподіл екситонної густини в квантовій ямі під металевими електродами різної форми з врахуванням електричних полів поблизу границі електродів.

У даній роботі проведено чисельні розрахунки розподілу екситонної густини в площині квантових ям під дією лазерної накачки модульованої різною формою вікон (коло, квадрат, прямокутник та пари кіл, квадратів, трикутників), що відповідає експериментам роботи [1]. Показано, що просторово-періодична структура у вигляді острівців конденсованої фази екситонів утворюється вздовж периметра вікон при деякому пороговому значенні накачки. При малих накачках структура відсутня. Зі збільшенням температури в системі структура з острівців спочатку зменшується по інтенсивності, далі, із підвищенням температури, зливається в кільце, а потім зовсім зникає. Також встановлено, що пастка створена електростатичним полем вікна в електроді не впливає на розподіл густини екситонів при заданих параметрах і геометрії системи.

1. *Timofeev V.B., Gorbunov A.V. // Low Temperature Physics. - 2011. - Vol. 37. - P. 229.*
2. *Chernyuk A.A., Sugakov V.I., Tomylo V.V. // Phys. Rev. B. - 2014. - Vol. 90. - P. 205308.*
3. *Tomylo V.V., Goliney I.Yu., Chernyuk A.A., Sugakov V.I. // Low Temperature Physics. - 2014. - Vol. 40. - P. 975.*

## **ВІД'ЄМНИЙ ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ ОПР У СВІТЛОДІОДАХ GaP**

**В. П. Таргачник, С. В. Малий, Г. П. Гайдар,  
О. В. Конорева, М. Б. Пінковська**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Стабільність і надійність роботи оптоелектронного пристрою може бути забезпечена лише за відсутності на його характеристиці стрибків напруги чи струму та коливань на окремих ділянках вольт-амперних характеристик (ВАХ). У поданій роботі наведені результати досліджень електрофізичних характеристик світлодіодних структур, виготовлених на основі фосфіду галію. Основний акцент зроблено на розгляді особливостей S-типу, які виникають на ВАХ досліджуваних об'єктів при низьких температурах [1].

GaP належить до непрямозонних напівпровідників; абсолютний мінімум C-зони розташований майже на краю зони Брілюєна у напрямку  $\langle 100 \rangle$ . Відсутність центра симетрії в сполуках  $A^{III}B^{IV}$  зумовлює розщеплення гілки  $E^C(k)$  в області абсолютного мінімуму на  $X_1^C$  та  $X_3^C$  стани, взаємно віддалені

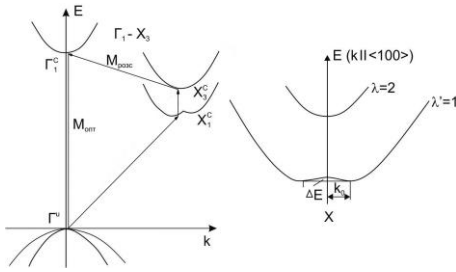


Рис. 1. Структура енергетичних зон і електронні переходи в  $\Gamma_1^C$ -мінімум.

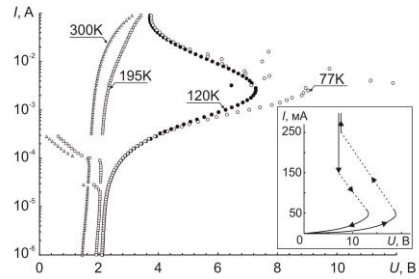


Рис. 2. ВАХ світлодіода GaP при різних температурах. На вставці – вертикальне зростання струму при низьких температурах в режимі генератора напруги.

між собою на 0,35 еВ. Стан  $X_1^C$  є нижчим і розташований на відстані  $\sim 0,08 \cdot 2\pi/a$  від точки X. В результаті взаємодії обох станів зона провідності в околі абсолютного мінімуму стає суттєво непараболічною і залежність  $E^C(k)$  приймає вигляд двогорбої кривої (camel's back)

Різке зростання провідності діода на нижній ділянці ВДО може бути зумовлене міждолинним перенесенням електронів із долини  $X_1^C$  у розташовану вище долину  $X_3^C$ , в якій ефективна маса носіїв – менша. Підвищення прикладеної до зразка напруги призводить до перенесення носіїв струму з бічної  $X_3^C$ -долини у центральну  $\Gamma_1^C$ , де ефективна маса  $m_e^*$  стає ще на два порядки меншою. Внаслідок цього розвивається друга, основна ділянка ВДО.

При зменшенні напруги, після перемикання у низькоомний стан, зворотня крива проходить іншим чином і утворює «петлю гістерезису», що, очевидно, зумовлено певною кількістю носіїв, що залишилися в  $\Gamma_1^C$ -мінімумі. В об'ємі зразка ділянці перемикання відповідає виникнення струмового шнура. Тому якщо не застосовувати обмежень струму – буде спостерігатися майже вертикальне зростання при досягненні напруги зриву, пов'язаного з рекомбінацією екситонів на ізольованих атомах азоту (рис. 2).

1. Манжара В.С., Тартачник В.П. Природа від'ємного диференційного опору фосфід-галієвих світлодіодів // УФЖ. - 2001. - Т. 46, № 2. - С. 196 - 200.
2. Lawaetz P. Camel's Back structure of the conduction band in GaP // Sol. St. Com. - 1975. - Vol. 16, No. 1. - P. 65 - 67.

# Тези доповідей з теорії ядерного синтезу та фізики плазми

## НАПРУЖЕНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПОЗИТИВНОГО СТОВПА ДУГОВОГО РОЗРЯДУ МІЖ МІДНИМИ ТА ГРАФІТОВИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ

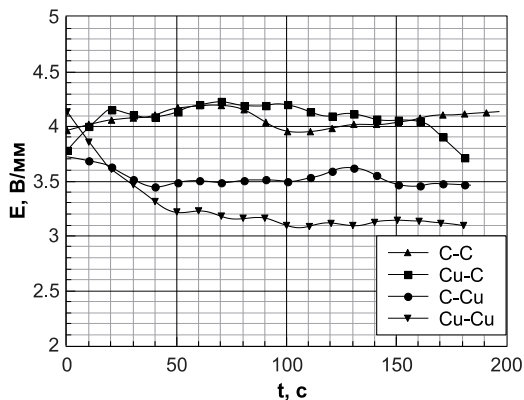
**А. М. Веклич, С. О. Фесенко, В. Ф. Борецький, М. М. Клешич**

*Факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ*

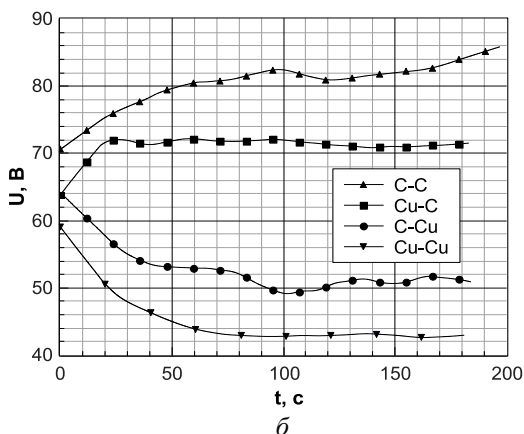
Виміряна часова розгортка напруженості електричного поля позитивного стовпа електродугового розряду. З цією метою використано модуляцію між-електродної відстані [1]. Електроди розміщувались вертикально, верхній катод. Для живлення розряду застосовано джерело постійного струму з напругою холостого ходу 260 В. Струм дуги встановлювався за допомогою баластного реостату і складав, приблизно, 3,5 А. Впродовж експерименту, опір реостату не змінювався. Дослідження виконувались для чотирьох випадків:

- 1) верхній та нижній електроди графітові (С-С);
- 2) верхній електрод мідний, нижній графітовий (Cu-C);
- 3) верхній електрод графітовий, нижній мідний (C-Cu);
- 4) обидва електроди мідні (Cu-Cu).

Під час горіння дугового розряду створюється потужний конвективний потік, який протидіє дифузії матеріалу верхнього електрода в область позитивного стовпа. Дійсно, з рисунку (а) видно, що напруженість електричного поля для випадків (С-С) та (Cu-C) майже однакова і становить, приблизно, 4,1 В/мм. Це підтверджується і напругою дуги (б), хоча вона дещо нижча для другого випадку внаслідок меншого катодного падіння потенціалу. Отже, матеріал верхнього електрода, для цих випадків, не впливає на напруженість поля позитивного стовпа. Проте, дещо інша ситуація спостерігається, коли нижній електрод мідний. З графіка (а) бачимо, що напруженість поля між мідними електродами (Cu-Cu) становить, близько, 3,2 В/мм, а для (С-С) 3,5 В/мм. Вплив матеріалу верхнього електрода на напруженість поля, для випадків (С-С) та (Cu-Cu), можна пояснити зменшенням швидкості конвективного потоку, оскільки нижній мідний електрод розігрівається значно менше, ніж нижній графітовий електрод у випадках (С-С) та (Cu-C). Спад напруженості поля з часом для випадків (Cu-Cu) та (С-С) пояснюється зростанням концентрації міді у плазмі позитивного стовпа за рахунок розігрівання нижнього електрода, а також утворенням на його поверхні оксиду  $\text{CuO}$ , який, розкладаючись, збагачує плазму парами міді.



a



б

Напруженість поля позитивного стовпа (а)  
та напруга дуги (б) електродугового розряду.

1. *Veklich A.N. et al. // XI Int. conf. "Electronics and applied physics" (Kyiv, Ukraine, Oct. 21 - 24, 2015). - P. 149 - 150.*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАЗМИ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РОЗРЯДУ МІЖ Cu-Ni ЕЛЕКТРОДАМИ

**А. М. Веклич, М. М. Клещич, С. О. Фесенко, В. Ф. Борецький**

*Факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ*

В електротехнічній галузі для комутації електричного струму використовуються спеціальні пристрої [1], які містять електроди або контакти. Під час

розробки цих приладів застосовуються композитні матеріали [1], виготовлені методами порошкової металургії [2]. Перевагою таких матеріалів є поєднання високої ерозійної стійкості та прийнятної теплопровідності і електропровідності. Очевидно, з метою оптимізації компонентного складу та розробки нових технологій виготовлення композитних матеріалів необхідно досконало вивчити вплив електричної дуги на робочий шар поверхні електродів. Тому, першочерговим завданням досліджень є розробка засобів контролю параметрів плазми таких розрядів [3].

Електродуговий розряд, вільно існуючий або в потоках газів (6.4 стандартних літрів на хвилину), запалювався між торцевими поверхнями неохолоджуваних електродів, що розміщені вертикально – верхній Ni (катод), а нижній Cu (анод). Розрядний проміжок складав 8 мм, діаметр електродів – 6 мм, струм дуги – 3.5 А. Потік газу (аргону або повітря) у цьому джерелі спрямовувався з боку верхнього електроду співвісно до розряду. Такого типу розряд можна розглядати як спрощену початкову модель електричної дуги між композитними електродами Cu–Ni.

Плазму електродугового розряду між Cu–Ni електродами в повітрі та в потоках газів (аргон або повітря) досліджували за допомогою оптичної емісійної спектроскопії у припущенні локальної термодинамічної рівноваги. Методом відносних інтенсивностей одержані радіальні профілі температури у стовпі плазми. Для визначення радіального розподілу температури використані спектральні лінії атомів міді та нікелю.

Додатково, з метою контролю внесеної електричної енергії в розрядний проміжок, виміряна напруженість електричного поля позитивного стовпа досліджуваного електродугового розряду. Показано, що потік газів у дузі між досліджуваними електродами істотно впливає на еволюцію напруженості електричного поля в часі.

1. *Буткевич Г.В., Белкин Г.С.* Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. - М.: Энергия, 1978. - 253 с.
2. *Минакова Р.В., Кресанова А.П., Чураков М.М., Хоменко Е.В.* Тенденции развития технологий изготовления композиционных материалов и контактов из них // Электрические контакты и электроды. - Киев: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. - 1998. - С. 5 - 19.
3. *Лохте-Хольтгревен В.* Методы исследования плазмы. - М.: Мир, 1971. - 552 с.
4. *Veklich A.N. et al.* // XI Int. conf. "Electronics and applied physics" (Kyiv, Ukraine, Oct. 21 - 24, 2015). - P. 149 - 150.

# НЕСТІЙКІСТЬ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ КОНЦЕНТРАЦІЇ В ГЕЛІКОННОМУ РОЗРЯДІ З ЛІНІЙНОЮ ЗБУДЖУЮЧОЮ СИСТЕМОЮ

**В. Ф. Вірко, Ю. В. Вірко, В. М. Слободян**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Геліконний розряд з лінійним збудженням може утворювати плазму, параметри якої є постійними вздовж однієї з координат [1]. Такий розряд може бути використаний для однорідної плазмово-технологічної обробки великих поверхонь шляхом їх поступового переміщення в поперечному напрямку [2]. Досліджено розподіли концентрації плазми у модифікованому геліконному розряді.

Розряд збуджувався індукційною антеною у вигляді двох паралельних провідників з протифазними ВЧ струмами, подібною до двопровідної передавальної лінії, площина якої перпендикулярна зовнішньому магнітному полю  $B_0$ . Експерименти проводились в аргоні при тиску 0,65 Па у магнітному полі до 10 мТ і при ВЧ потужності до 1 кВт на частоті 13,56 МГц. Вимірювались розподіли іонного струму на спеціально розроблений секціонований 20-колекторний пристрій (профілометр), який імітує оброблювану поверхню. За допомогою механічного комотатора колектори послідовно приєднувались до вимірювальної схеми і відтворювали профіль розподілу іонного струму вздовж лінійної антени. Дослідження поширено на режими збудження розряду в нерезонансних умовах, коли відстань між антеною і оброблюваною поверхнею менша за довжину стоячої геліконної хвилі в напрямку магнітного поля. Показано, що в цьому випадку збільшення магнітного поля  $B_0$  не викликає стрибків концентрації, характерних для резонансних розрядів і пов'язаних зі зміною мод стоячих геліконних хвиль. Встановлено, що в цьому випадку розряд з достатньою однорідністю концентрації вздовж антени можна реалізувати лише при наявності магнітного поля певної напруженості ( $B_0 \leq 4$  мТ). При перевищенні оптимального магнітного поля розподіл концентрації стає нестійким і плазма зосереджується біля одного з кінців антени, тоді як з іншого боку її концентрація різко спадає. В цих умовах, при підвищенні ВЧ потужності в розряді виникає популяція енергійних електронів, що проявляється у зростанні від'ємного плаваючого потенціалу в плазмі (до  $-60$  В). Виявлено, що такий асиметричний перерозподіл концентрації ініціюється електростатичною складовою зв'язку антени з плазмою. В нерезонансних умовах концентрація плазми виявляється меншою, а область її однорідності більшою (і може досягати 80% від довжини антени), у порівнянні з резонансним розрядом.

Розподіл високочастотного магнітного поля  $\vec{B}_Z$  вздовж антени виявляє ознаки стоячої хвилі, що поширюється перпендикулярно до зовнішнього магнітного поля  $B_0$ . На відміну від геліконів довжина цих хвиль зменшується

при збільшенні магнітного поля і не залежить від концентрації плазми. Висловлено припущення про можливий зв'язок розподілу концентрації з цим хвильовим процесом.

1. *Borisenko A.G., Beloshenko M.A., Virko V.F. et al. Modified Helicon Discharge excited by a Linear Inductive Antenna // Problems of Atomic Science and Technology. - 2014. - No. 6. Series: Plasma Physics (20). - P. 153 - 156.*
2. *Chen F.F., Torreblanca H. Large-area helicon plasma source with permanent magnets // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2007. - Vol. 49, No. 5A. - P. A81 - A93.*

## **ПЛАЗМОВА АКТИВАЦІЯ КАТАЛІЗАТОРІВ СИНТЕЗУ РІДКИХ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН З СИНТЕЗ-ГАЗУ**

**Д. К. Гамазін<sup>1</sup>, В. В. Юхименко<sup>1</sup>, В. Я. Черняк<sup>1</sup>, В. А. Бартишевський<sup>2</sup>,  
Р. В. Корж<sup>2</sup>, Е. В. Мартиш<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут органічної хімії НАН України, Київ*

На даний час значна кількість робіт присвячена отриманню палив з відновлювальної органічної сировини природного походження («зелена» енергетика) та з відходів. Існують підходи, що дають змогу отримувати синтез-газ з органічної сировини за допомогою плазмового каталізу з високою ефективністю. Однак, дуже часто використання рідких видів палива є доцільнішим, аніж використання синтез-газу. Окрім того, рідина – більш зручна сировина для подальшої хімічної переробки. Отримання рідких видів палив з синтез-газу на даний час відбувається завдяки каталітичним процесам, наприклад – процесу Фішера - Тропша. Однак, через відносно невисоку ефективність каталізаторів, та через процеси отруєння каталізатора – економічно вигідним є лише у великих об'ємах.

За одночасного використання плазмової обробки та каталізатора можна досягти синергічного [1] ефекту, що робить перспективним розробку систем з плазмовою активацією каталізатора. У досліджуваній системі у якості джерела плазми для активації кобальтовмісний каталізатора процесу Фішера - Тропша використано обертовий ковзний розряд у циліндричній камері змінного діаметру. У якості джерела тепла для початкового розігріву каталізатора до робочих температур у системі виступає розряд. Загартування продуктів реакції відбувалось на водоохолоджуваній поверхні.

1. *Neyts E.C. et al. Plasma Catalysis: Synergistic Effects at the Nanoscale // Chemical reviews. - 2015.*



# МАС-СПЕКТРОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ПЛАЗМИ ВЧ-РОЗРЯДУ В ГАЛОГЕНОВМІСНИХ ГАЗАХ

**В. В. Гладковський, Б. П. Полозов, О. А. Федорович**

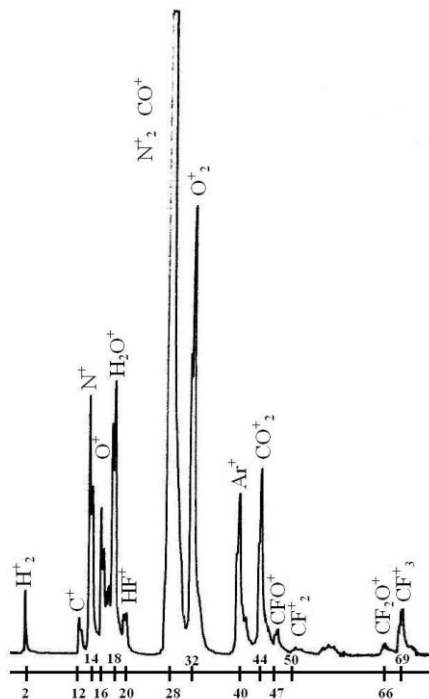
*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Плазмохімічне травлення різних напівпровідникових матеріалів широко використовується для отримання нанорозмірних структур. Для цього використовується низькотемпературна багатокомпонентна плазма. Найбільш важливим аспектом її використання, порівняно із традиційними хіміко-технологічними процесами, являється її нерівноважність. Відомо, що в хімічних реакціях беруть участь не всі частинки, а лише ті, енергія яких перевищує певне значення порогової енергії активації реакції. Відповідно до закону рівнорозподілу в рівноважних умовах на кожен ступінь вільності молекули припадає в середньому однакова енергія  $\frac{1}{2} kT$ . Згідно з цим усі частинки суміші газів, і навіть ті, які не беруть участі в хімічних реакціях, отримують однакову долю енергії. Концентрація частинок в основному стані завжди більша концентрації частинок в збудженому стані. З вищезазначеного випливає, що енергетична ефективність звичайних хімічних реакцій невисока. Що стосується нерівноважної плазми з

великою кількістю радикалів, то за допомогою її порівняно високої температури електронів та середньої енергії іонів, можна керувати енергією активації, яка необхідна для протікання хімічних реакцій. Така особливість плазми дає можливість отримувати значно більшу ефективність хімічних реакцій, включаючи такі, що в звичайних умовах не відбуваються.

Однією з найбільш ефективних методик контролю плазмохімічних процесів, які протікають в плазмохімічних реакторах, являється мас-спектрометрія. Мас-спектрометричні дослідження дадуть змогу визначити оптимальний якісний склад плазми і найбільш ефективні умови роботи розрядів для процесів травлення технологічних шарів, а також досягнення найменшого викиду шкідливих газів у атмосферу.

Для експериментальних досліджень використовувалася високочас-



тотна установка «Тріон» з керованим магнітним полем, яка працює на частоті 13,56 МГц. ВЧ-розряд відбувається в галогеновмісних газах типу: SF<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> та їхніх сумішах з киснем. На рисунку представлено мас-спектрограму, яка знімалася при розряді в газовій суміші CF<sub>4</sub> + O<sub>2</sub> (20 %). Отримана мас-спектрограма свідчить про високий ступінь дисоціації молекули CF<sub>4</sub>, оскільки спостерігається атомарний вуглець. На мас-спектрограмі виявлено також молекулярний та атомарний кисень, і азот. Спостерігаються також радикали CF<sub>2</sub>, CF<sub>3</sub>, які відповідають за полімеризацію фторвуглецю на поверхні оброблювальних зразків. В той же час спостерігається надзвичайно отруйна речовина фторфосген (COF<sub>2</sub>), як і його аналог фосген (COCl<sub>2</sub>), що має задушливу дію при його вдиханні. Синтез даної речовини може відбуватися при наступних хімічних реакціях: CF<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O → COF<sub>2</sub> + 2HF, CO + F<sub>2</sub> → COF<sub>2</sub>.

Незважаючи на утворення токсичних речовин Хладон – 14 залишається одним із найбільш використовуваних газів для селективного травлення SiO<sub>2</sub> по відношенню до Si. Оскільки енергія зв'язку молекули SiO<sub>2</sub> рівна 4,87 еВ, то при використанні CF<sub>4</sub>, можлива реакція заміщення з додатковим виділенням енергії і утворенням C+O → CO + 11,11 еВ. Тому CF<sub>4</sub> є добрим природним травником двоокису кремнію.

## **КІНЕТИКА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РЕФОРМІНГУ ВУГЛЕВОДНІВ У ПЛАЗМО-КАТАЛІТИЧНІЙ СИСТЕМІ**

**Т. С. Донченко<sup>1</sup>, О. М. Цимбалюк<sup>1</sup>, В. Я. Черняк<sup>1</sup>, Д. С. Левко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

<sup>2</sup> *The University of Texas, Austin, TX, USA*

Існують два основних підходи в плазмохімії для реформування рідких вуглеводнів в син-газ: плазмовий та плазмо-каталітичний. При першому підході конверсія відбувається за рахунок плазмо-хімічних перетворень в самій плазмі. В плазмову область інжектуються всі необхідні реагенти такі як: вуглеводень та різні гази (H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, повітря). Особливістю другого підходу є те, що основні перетворення конверсії відбуваються в високотемпературному хімічному реакторі. Плазма використовується в ролі каталізатора хімічних перетворень. Плазмоутворюючим газом можуть виступати як окремі реагенти реформінгу, так і їхні суміші. При цьому плазмою може активуватися тільки частина реагенту.

Для даних технологій реформування проводяться експериментальні дослідження, але вони не дають повної картини, що саме відбувається в об'ємі хімічного реактора. У зв'язку з чим виникає потреба в проведенні симуляції кінетики для більш повного розуміння фізико-хімічних процесів в плазмових та плазмо-каталітичних системах.

На сьогодні симулювання кінетики конверсії більш досліджено для плазмового реформінгу, а для плазмо-каталітичного підходу не проведено. Хоча

відомо, що він є більш перспективним виходячи з енергоефективності та продуктивності. Саме тому в даній роботі розглядаємо конверсію вуглеводню в плазмо-каталітичній системі. Модельним вуглеводнем є етиловий спирт, який в свою чергу є перспективним «зеленим паливом». У роботі розглянута фізична модель для симуляції кінетики фізико-хімічних процесів в гібридних плазмо-каталітичних системах. Відповідно до фізичної моделі об'єм хімічного реактора можна поділити на декілька зон: хімічний процес реформінгу або піролізна частина; плазмова частина; основна зона реформінгу. Для симуляції кінетики першої зони використовуємо близько 100 хімічних реакцій та 30 компонент. Розрахунки проводилися за допомогою програмного коду ZDPlasKin [1]. Даний програмний код дає змогу досліджувати еволюцію концентрацій компонент в часі для нетермічної плазми з довільно заданими процесами між компонентами.

У доповіді будуть представленні основні результати розрахунків та залежності концентрацій від часу основних компонент реформінгу вуглеводнів для плазмо-каталітичної системи.

1. *Pancheshnyi S., Eismann B., Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C.* Computer code ZDPlasKin // <http://www.zdplaskin.laplace.univ-tlse.fr> (University of Toulouse, LAPLACE, CNRS-UPS-INP, Toulouse, France, 2008).

## **ГЛОБАЛЬНІ МОДИ $3m = n$ ТА ЇХНЯ ДЕСТАБІЛІЗАЦІЯ В ПРИЙДЕШНІХ ЕКСПЕРИМЕНТАХ З НЕЙТРАЛЬНОЮ ІНЖЕКЦІЄЮ В СТЕЛАРАТОРІ WENDELSTEIN 7-X**

**Я. І. Колесниченко<sup>1</sup>, А. Кьоніс<sup>2</sup>, В. В. Луценко<sup>1</sup>,  
М. Дрєвляк<sup>2</sup>, Ю. Туркін<sup>2</sup>, П. Геландер<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут фізики плазми Макса Планка, Грайфсвальд, Німеччина*

Нестійкості плазми, що збуджуються енергійними іонами, спостерігалися в багатьох тороїдальних термоядерних пристроях й мали різні властивості та наслідки. Зокрема, нестійкості, спричинені іонними пучками, що утворювалися при нагріванні плазми пучками нейтральних атомів, спостерігалися в експериментах на стелараторі Wendelstein 7-AS (W7-AS) [1 - 3]. У цьому пристрої іонно-пучкові нестійкості мали місце в розрядах як з низьким, так і з високим тиском; однак в останньому випадку вони були швидкоплинними й виникали після переходу на повну потужність нагрівання в режимі зростання густини плазми. Тому є важливим зрозуміти, яким буде вплив енергійних іонів на стійкість плазми у новому стелараторі серії Вендельштайн, а саме, в оптимізованому стелараторі Wendelstein 7-X (W7-X), спорудження якого вже практично завершено в Інституті фізики плазми Макса Планка. Це й спонукало авторів до виконання роботи, націленої на вивчення стійкості плазми у

стелараторі W7-X під час інжекції пучків нейтральних атомів.

Wendelstein 7-X, як і його попередник Wendelstein 7-AS, характеризується малим магнітним широм. Однак, обертальне перетворення магнітних силових ліній ( $\iota$ ) у W7-X, на противагу W7-AS, є близьким до одиниці. Зазначимо, що  $\iota$  у Геліас-реакторі (пристрій серії Wendelstein) буде також близьким до одиниці [4].

У роботі показано, що моди альфвенового типу з глобальною радіальною структурою існують та резонансно взаємодіють з енергійними іонами, що є дестабілізуючим фактором. Ці моди характеризуються рівними полоїдальними та тороїдальними хвильовими числами ( $m = n$ ) й можуть збуджуватися при  $2 \leq m \ll 10$ .

Проведений аналіз включає: (а) виведення рівняння для скалярного потенціалу збудженого електромагнітного поля у стислій плазмі з енергійними іонами, (б) розрахунки власних мод на основі цих рівнянь кодами BOA та CAS3-D, (в) аналіз стійкості як методом теорії збурень, так і без її нього (non-perturbatively), (г) вивчення властивостей енергійних іонів та впливу на них рівноважного радіального електричного поля. Аналіз проведено для «дзеркальної» (high-mirror) магнітної конфігурації. Пітч-кути та максимальна енергія інжекттованих іонів вибиралася у відповідності до планів перших експериментів на W7-X з інжекцією пучків нейтральних атомів.

Робота частково підтримана проектом НАНУ-УНТЦ #6058.

1. *Weller A., Anton M., Geiger J. et al. // Phys. Plasmas. - 2001.- Vol. 8. - P. 93.*
2. *Weller A., Geiger J., Werner A. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2003. - Vol. 45. - P. A285.*
3. *Hirsch M., Baldzuhn J., Beidler C.D. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2008. - Vol. 50. - P. 053001*
4. *Beidler C.D., Harmeyer E., Herrnegger F. et al. // Nucl. Fusion.- 2001. - Vol. 41. - P. 1759.*

## **ПРОЯВИ ГЕОДЕЗИЧНОЇ АКУСТИЧНОЇ МОДИ, ЗБУРЕНОЇ ЕНЕРГІЙНИМИ ІОНАМИ В ТОКАМАЦІ**

**Я. І. Колесниченко<sup>1</sup>, Б. С. Лепявко, В. В. Луценко<sup>1</sup>, Ю. В. Яковенко<sup>3</sup>,  
Б. Грієрсон<sup>2</sup>, В. В. Хейдбрінк<sup>3</sup>, Р. Назікян<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, NJ, USA*

<sup>3</sup> *University of California-Irvine, Irvine, CA, USA*

Проведено теоретичні дослідження взаємодії у токамаці пролітних енергійних іонів з геодезичною акустичною модою (GAM), збуреною завдяки інжекції нейтрального пучка (E-GAM). Було показано, що, завдячуючи сут-

тєвим коливанням густини плазми ( $\tilde{n}/n_0 \geq 1\%$ ,  $\tilde{n}$  – збурення густини плазми,  $n_0$  – густина плазми), характерними для хвиль GAM [1], з’являється новий механізм гальмування швидких іонів – внаслідок передачі енергії іонів хвилі. Ця передача відбувається внаслідок резонансної взаємодії ( $\omega = \omega_t$ ,  $\omega_t$  – транзитна частота пролітного іону,  $\omega$  – частота моди). Таким чином іони можуть втрачати значну частину початкової енергії за час, що є значно меншим за характерний час охолодження внаслідок зіткнень.

Одним з наслідків такої взаємодії є зміна інтенсивності D-D реакції між іонізованими частинками інжектваного пучка та плазмою. Індикатором цього явища було зменшення нейтронної емісії під час збурення моди GAM, що була виміряна експериментально [1]. Розроблена теорія пояснює цю зміну. Показано, що іони, взаємодіючи з хвилею резонансним чином, віддають частку своєї енергії, а завдяки збереженню узагальненого моменту імпульсу  $P_\phi$  (що є особливістю мод GAM) це призводить до радіального зміщення цих іонів у напрямку до центра плазми (якщо напрям інжекції збігається з напрямом плазмового струму) або ж на периферію (у випадку протилежного напрямку, так звана контр-інжекція). Втрата енергії призводить до «розмиття» функції розподілу швидких іонів і утворення на ній плато в межах резонансної області, а радіальне зміщення – до просторового перерозподілу пучка. Обидва згадані механізми призводить до зміни перерізу реакції синтезу між іонами пучка та плазми, а саме ці реакції домінують за умов  $E_i \gg E_p$  та  $T < 10$  кеВ ( $E_i$ ,  $E_p$  – енергія іонів та плазми,  $T$  – температура плазми). Було зроблено оцінку вкладу обох факторів та показано, що сповільнення іонів грає більш значну роль для зміни інтенсивності реакції. Фактор радіального зміщення є менш значущим, а для реакторів майбутнього, наприклад, ITER, – взагалі є нехтовним.

У роботі також було оцінено роль гранично пролітних частинок (marginally passing particles) [2], що було важливо для пояснення експериментальних результатів з роботи [1], так як частота E-GAM в цій роботі була майже вдвічі нижчою, ніж частота GAM. А отже, саме ці частинки були резонансними в цьому експерименті. Було показано, що наведена теорія застосовна для цього випадку. Тим не менше, теоретичні втрати за рахунок взаємодії швидких іонів з хвилею для цього розряду оцінено на рівні 7 %, в той час як експериментально виміряні втрати становлять 10 - 15 %. Різниця пояснюється існуванням інших механізмів втрат – зокрема, трансформацією орбіт частинок, внаслідок якої пролітні частинки перетворюються в захоплені.

1. Nazikian R. et al. // Phys. Rev. Lett. - 2008. - Vol. 101. - P. 185001.
2. Kolesnichenko Ya. I. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion, submitted in 2015.

# СПЕКТРОСКОПІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАЗМИ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РОЗРЯДУ МІЖ КОМПЗИТНИМИ Cu-Cr ЕЛЕКТРОДАМИ

А. В. Лебідь<sup>1</sup>, А. М. Веклич<sup>1</sup>, О. В. Хоменко<sup>2</sup>

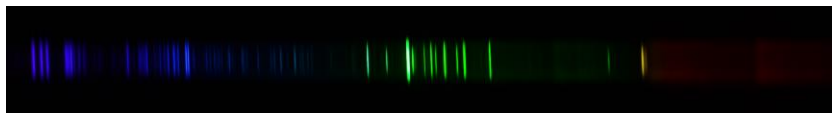
<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем, Київ

<sup>2</sup> Інститут проблем матеріалознавства  
ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

Композитні матеріали на основі міді та хрому розробляються для роботи в якості контактів електричних вакуумних вимикачів. При комутації струму в цих приладах виникають електричні дуги, які спричиняють ерозію поверхні контактів та потрапляння їх матеріалу в розрядний проміжок. У зв'язку зі складнощами дослідження вакуумних дуг, у даній роботі модельне джерело електродугової плазми в потоці аргону, що дозволяє уникнути окислення електродів.

В роботі досліджено спектри випромінювання плазми електродугового розряду між електродами, виготовленими з композитних матеріалів Cu-Cr. Використані композитні матеріали виготовляються шляхом спікання у присутності рідкої фази з подальшим високотемпературним пресуванням. Композитні матеріали відрізнялись як вмістом хрому та міді у складі електродів: 30 % - 70 % або 50 % - 50 %; так і умовами виготовлення їх, а саме – температурою на етапі високотемпературного пресування: 750 або 1050 °С.

Спектр випромінювання плазми електродугового розряду між композитними Cu-Cr електродами (рисунок) містить спектральні лінії міді та хрому, які можуть бути використані для визначення температури та співвідношення концентрацій цих металів у плазмі. Характерною особливістю спектра випромінювання атома хрому є велика кількість ліній, деякі з яких слабо розділяються між собою та можуть перекриватись з лініями атома міді. Тому, враховуючи результати попередніх досліджень [1], значну увагу в даній роботі приділено вибору спектральних ліній хрому, придатних для діагностики плазми.



Спектр випромінювання плазми електродугового розряду силою струму 3,5 А між композитними Cu-Cr електродами в потоці аргону.

1. Веклич А.М., Лебідь А.В., Сірик О.О., Хоменко О.В. Дослідження плазми електродугового розряду з домішками міді та хрому // Сб. тр. інститута проблем матеріалознавства ім. І.Н. Францевича НАН України. Серія: Композиційні, шарові та градієнтні матеріали та покриття. Електричні контакти та електроди. - 2014. - С. 47 - 54.

## ПЛАЗМОВИЙ ПРИСКОРЮВАЧ ІЗ ЗАМКНЕНИМ ДРЕЙФОМ ЕЛЕКТРОНІВ ТА ГАЗОВИМИ СТІНКАМИ

**І. В. Літовко<sup>1</sup>, О. А. Гончаров<sup>2</sup>, А. М. Добровольський<sup>2</sup>,  
І. В. Найко<sup>2</sup>, Л. В. Найко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут фізики НАН України, Київ*

Прискорювачі із замкненим дрейфом електронів і відкритими (газовими) стінками не були досліджені досі, на відміну від добре відомих і широко використовуваних плазмових прискорювачів з анодним шаром і прискорювачів із замкнутим дрейфом електронів і діелектричними стінками [1]. Однак прискорювач цього типу може бути цікавим для керування потоку заряджених частинок, а також може бути привабливим для різних високотехнологічних застосувань, зокрема, для потенційної розробки низько вартісних іонних ракетних двигунів [2]. Вони мають ряд переваг, а саме: мінімізація твердо тільних стінок веде по-перше, до зменшення вмісту матеріалу стінок у іонному пучці, а по-друге, сприяє збереженню динаміки електронів плазмового середовища, так як зводяться до мінімуму умови утворення вторинних електронів за рахунок емісії зі стінок плазмового прискорювача.

Для вивчення прискорювача такого типу було створено його експериментальну модель, а також побудована теоретична одновимірна модель, яка базується на рівняннях гідродинаміки [3]. Однак, гідродинамічна модель не враховує процеси іонізації, а також вплив нейтралів на динаміку системи. Тут ми приводимо результати отримані у рамках гібридної моделі, коли для електронної компоненти використовується гідродинамічний опис, а для іонної та нейтральної – кінетичний. Такий опис дає змогу також врахувати вплив обмеженості часу прольоту іонів на динаміку системи. Показано, що падіння потенціалу в прискорюючому проміжку може відбуватися повністю, неповністю або перевищувати прикладений потенціал, в залежності від фізичних параметрів системи. Порівняння з гідродинамічною моделлю показує незначну різницю в результатах обчислення, що дає змогу стверджувати, що гідродинамічна модель досить добре описує досліджувану систему, а до її переваг можна віднести можливість отримання точних аналітичних рішень.

1. *Морозов А.И.* Введение в плазмодинамику. - М.: Физматлит, 2006. - 576 с.
2. *Litovko I., Goncharov A., Dobrovolskii A. et al.* // ВАНТ. - 2015. - № 4(98).
3. *Goncharov A., Litovko I., Dobrovolskii A. et al.* // Rev. Sci. Instrum. - 2015. - Vol. 87. - P. 02A501.

## ВПЛИВ ПЕРЕХІДНИХ ЧАСТИНОК НА НЕСТІЙКОСТІ ПЛАЗМИ У КВАЗІ-ІЗОДИНАМІЧНОМУ СТЕЛАРАТОРІ

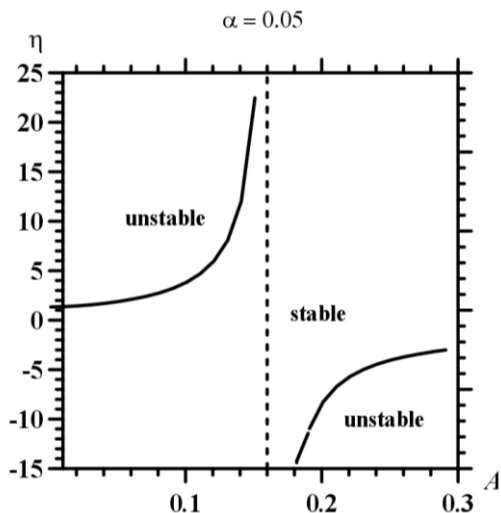
**В. С. Марченко, С. М. Резник**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Досліджено вплив перехідних частинок на альфвенові хвилі та електро-статичні моди на захоплених іонах у стелараторі із замкнутими контурами другого адиабатичного інваріанту, які не збігаються з магнітними поверхнями (так званий квазі-ізодинамічний стеларатор).

Показано, що завдяки орбітальним трансформаціям, які виникають у результаті баунс-усередненого магнітного дрейфу, при достатньо високій температурі електронів гамування альфвенових мод локалізованими електронами перестає залежати від частоти зіткнень.

Установлено, що дисипативні моди на захоплених іонах (моди Кадомцева - Погуце) сильно стабілізуються орбітальними переходами.



Область нестійкості мод Кадомцева - Погуце на площині  $(\eta, A)$  при певній частоті зіткнень іонів. Позначення:  $\alpha$  – ефективна частота зіткнень локалізованих іонів нормована на частоту моди;  $A$  – частота орбітальних переходів між локально пролітним та локально захопленим станами руху, нормована на частоту моди;  $\eta$  – логарифмічний градієнт температури іонів нормований на логарифмічний градієнт концентрації плазми.  $A = 0$  відповідає токамаку або ідеальному ізодинамічному стеларатору (тобто стеларатора без перехідних частинок).



## СЕРЕДНЯ ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРОНІВ ПЛАЗМИ У ПЛАЗМОВО-РІДИННІЙ СИСТЕМІ ДЛЯ КАТАЛІЗУ ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

**О. А. Недібалюк, І. І. Федірчик, В. Я. Черняк**

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

Низька енергоефективність існуючих плазмових технологій та малий час життя електродів у традиційних джерелах плазми на основі електричних розрядів накладають значні обмеження на можливості широкомасштабного впровадження плазмохімічних технологій у промисловість. Високу ефективність використання плазми можна забезпечити за рахунок її інтеграції в існуючі хімічні технології як генератора активних частинок, які здатні ініціювати та прискорювати перебіг хімічних реакцій. Оскільки найвища селективність хімічних процесів забезпечується у випадку генерування неізотермічної плазми, поєднання плазмової та хімічної технології можливе лише у випадку створення нових джерел плазми, які здатні генерувати потік неізотермічної плазми та вводити його в хімічний реактор.

Вимогам наведеним вище, може задовольняти динамічна плазмово-рідинна система зі зворотно-вихровим потоком повітря типу «торнадо» з рідким електродом (ТОРНАДО-РЕ), яка генерує плазму атмосферного тиску для плазмово-каталітичних застосувань. Для даної плазмово-рідинної системи виміряно приведене електричне поле в розрядному проміжку та визначено середню енергію електронів плазми за допомогою коду BOLSIG+ [1] (версія 06/2013, базу перетинів завантажено з [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net) у червні 2013 р.). Досліджено вплив газу, який утворюється під час електролізу, на параметри розряду.

Виявлено механізм впливу на середню енергію електронів у плазмі динамічних плазмово-рідинних систем за допомогою зміни складу плазмотвірного газу, а саме, зі збільшенням вмісту води в плазмотвірному газі середня енергія електронів в плазмі зростає. Газ, який утворюється під час електролізу води, впливає на параметри розряду – його внесення безпосередньо в розрядний проміжок веде до збільшення падіння напруги під час горіння розряду.

Робота виконана за часткової підтримки Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Міністерства освіти і науки України та Національної академії наук України.

1. Hagelaar G. J. M. et al. // Plasma Sources Science and Technology. - 2005. - Vol. 14. - P. 722.

## **ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ РОЗСІЯННЯ І ТРАНСФОРМАЦІЇ ХВИЛЬ ПРИ ПАРАМЕТРИЧНОМУ ЗБУДЖЕННІ ДРЕЙФОВИХ КОЛИВАНЬ**

**В. М. Павленко, В. Г. Панченко, М. А. Бєлошенко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Відомо, що взаємодія хвиль, які поширюються в плазмі, із флуктуаційними коливаннями може призводити до таких нелінійних явищ, як розсіяння і трансформація (взаємне перетворення) хвиль. Інтенсивності комбінаційного розсіяння і трансформації хвиль визначаються рівнем флуктуацій. У нерівноважних умовах (наявність параметричної нестійкості, присутність зовнішнього електричного поля чи потоку заряджених частинок) інтенсивність флуктуаційних коливань може значно зростати і суттєво перевищувати рівень теплових шумів, який притаманний спокійній плазмі.

Слід зазначити, що аналізуючи розсіяне і трансформоване випромінювання, можна отримати детальну інформацію про параметри плазми, що є актуальним для плазмової діагностики.

На основі кінетичної теорії флуктуацій у доповіді проведено порівняльний аналіз двох нелінійних процесів – розсіяння і трансформації хвиль в турбулентній плазмі. Турбулентність плазми обумовлена параметричною нестійкістю, яка спричинена дією зовнішньої хвилі накачки з частотою, що знаходиться в області верхньогібридного резонансу. Зазначимо, що має місце розпад хвилі накачки на дочірню верхньогібридну хвилю та електронно-дрейфові коливання. При цьому основний внесок в корелятор електронної густини, який визначає величину диференційного перерізу нелінійного процесу, вносять доданки, обумовлені наявністю поля накачки.

Отримано аналітичні вирази для обох поперечників (розсіяння і трансформації) та знайдена їхня залежність від градієнта густини плазми. Показано, що домінуючий внесок у величину розсіяння і трансформації здійснюють низькочастотні турбулентні флуктуації на дрейфовій частоті електронів. Зроблено висновок про взаємну конкурентоспроможність обох нелінійних процесів в неоднорідній турбулентній плазмі.

Результати роботи дають змогу прояснити вплив неоднорідності густини на процеси розсіяння і трансформації в лабораторній і космічній плазмі.

## **ВПЛИВ КОМПОНЕНТНОГО СКЛАДУ ПЛАЗМИ ІМПУЛЬСНИХ РОЗРЯДІВ У ВОДІ НА ЇЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ**

**П. В. Порицький, П. Д. Старчик**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

В плазму імпульсних розрядів у воді (ІРВ) неодмінно потрапляють домішки матеріалу електродів та провідників, які застосовуються для ініціювання

розрядів. Атоми металів можуть суттєво впливати на властивості плазми таких розрядів і викликати зміни у перебігу розрядних процесів, розподілі струмів та енерговиділення у розрядних каналах.

Надходження домішок матеріалів електродів в ІРВ підтверджують спостереження за динамікою змін розподілів спектрів випромінювання вздовж і поперек розрядних каналів. Оскільки повна непрозорість плазмових каналів ІРВ на початкових стадіях розрядів не дає змоги детально прослідкувати за процесом надходження металу у плазму в цей час, спостереження при цьому реабсорбованих ліній  $\text{Cu}$  у випромінюванні ІРВ дає змогу зробити однозначний висновок про інтенсивне надходження матеріалу мідних електродів у канал і наявність його не тільки у внутрішніх, а і у зовнішніх областях каналів. Звертає на себе увагу те, що через певний час матеріал електродів розповсюджується до найбільш віддаленої від електродів центральної частини каналів навіть при максимально досліджених розмірах розрядних проміжків. Спостереження за розвитком розрядів у більш пізні періоди, коли плазма стає прозорою, дає змогу з'ясувати механізм прискореного надходження матеріалу електродів у плазму. Крім надходження у розрядний канал випареної речовини завдяки дифузії, при сильнострумових розрядах спостерігаються факельні викиди розплаву вздовж осі плазмових каналів, розвиток великомасштабних турбулентних збурень в плазмі.

Для розрахунків транспортних властивостей найбільш широко використовується метод Чепмена - Ескога. Проте обсяг обчислень за цим методом швидко зростає зі збільшенням порядку наближень. Зазначених вад позбавлений метод моментів Греда, який може розглядатися як альтернативний. Розрахункова процедура цього методу краще структурована, її проміжні стадії піддаються контролю за допомогою спрощених моделей плазми.

За допомогою методу Греда в даній роботі визначені коефіцієнт електропровідності в повітряній та водно-паровій плазмі з додаванням електродних матеріалів: міді, вольфраму, заліза в діапазоні від 0,001 об.% вмісту металу в плазмі до повністю насиченої металеві плазми, а також в умовах відхилення від рівноваги. Розраховані властивості повітряно-металевої дугової плазми дають змогу прогнозувати стабільність такого типу розрядів. Встановлено аномальну можливість зниження провідності щільної водяної плазми при додаванні домішок металу. Показана придатність методу Греда для розрахунків транспортних властивостей багатоконпонентної термічної плазми, проведене його порівняння з відповідною розрахунковою процедурою методу Чепмена - Енскога.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МІКРОРОЗРЯДНИХ СИСТЕМ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ГЕНЕРОВАНОЇ ПЛАЗМИ

**Ок. В. Соломенко, Ол. В. Соломенко, В. Я. Черняк, В. В. Лендел,  
Є. В. Мартиш, Д. О. Калустова, І. В. Присяжневич**

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

Одним з найбільш перспективних напрямків у нерівноважній плазмохімії сьогодні вважають генерацію мікророзрядної плазми. Даній тематиці присвячено велика кількість статей, адже застосування вище названої плазми відкриває нові можливості в різних прикладних застосуваннях. У медицині інтерес до різноманітних мікроплазмових систем забезпечується їхньою здатністю генерувати низькотемпературну нерівноважну плазму атмосферного тиску. Температура електронів у такій плазмі (~ кілька електрон-вольт), як правило, є достатньою для ініціалізації багатьох хімічних реакцій – модифікації ДНК, білків і клітинних мембран; напрацювання радикалів. У той же час температура важкої компоненти (іонів та нейтралів) близька до кімнатної, тому процес плазмової обробки не руйнує чутливі до температури біологічні тканини. Процеси дезінфекції, дезактивації та стерилізації за участю активних частинок плазми (радикалів, заряджених частинок, збуджених частинок, УФ випромінювання) відбуваються досить швидко.

Ще одним перспективним завданням є використання плазмових конструкцій для модифікації поверхні [2]. Так, наприклад, в авіапромисловості для теплового захисту ракетних двигунів використовують етилен пропілен дієновий каучук, який має низьку вартість та чудові властивості для застосування в порівнянні з іншими еластомерами. В той же час, він має низькі значення поверхневої енергії, що знижує адгезійні властивості твердого палива. Застосування плазмової обробки є цікавою альтернативою для зміни поверхні каучуку, що не буде створювати шкідливих побічних продуктів і залишить незмінними його об'ємні властивості.

У даній роботі розроблено мікророзрядну плазмову систему з вихровим потоком. Застосування вихрового потоку може збільшити час роботи системи за рахунок зменшення фактора руйнації електродів під впливом плазми та стабілізувати плазмовий факел у просторі. Також, при суттєвому зменшенні геометричних розмірів електродної системи можна очікувати температуру важкої компоненти, яка була б близьку за значенням до кімнатної, що і було реалізовано у даній роботі.

Конструкція генератора мікророзряду представляла собою аксіально-симетричну систему, в якій електроди мали водяне охолодження. Тангенційно до бічної поверхні вводився робочий газ (повітря, Ag чи CO<sub>2</sub>), який видувався із отвору  $d$  (0,5, 1,0, 1,5 або 2,0 мм) за потоку  $G$  (0,5 ÷ 3,0 л / хв). Мідні електроди (внутрішній у вигляді дротини із конусним закінченням і зовніш-

ній плоский електрод з товщиною 1 мм) знаходилися на відстані 1 мм один від одного. Як джерело живлення використовувався блок живлення БП-138 із позитивним значенням високого потенціалу або БП-100 із негативним значенням високого потенціалу. Зовнішній електрод завжди був заземленим.

Методом оптичної емісійної визначалися компонентний склад плазми мікророзряду, відносні концентрації компонент плазми та температури заселення електронних, коливальних та обертових рівнів компонент плазми мікророзряду.

Ця робота була виконана за часткової підтримки Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Міністерства освіти і науки України, Національної академії наук України.

1. *Daseco J.A. et al. // Plasma Medicine. - 2014. - Vol. 4(1 - 4). - P. 1 - 10.*
2. *Oliveira M.S. et al. // Surface Engineering. - 2010. - Vol. 26. - P. 519 - 524.*

## **ТОРЦЕВОЙ ВРАЩАЮЩИЙСЯ СКОЛЬЗЯЩИЙ РАЗРЯД**

**Е. В. Соломенко, В. В. Юхименко, В. Я. Черняк, Д. Л. Чернолуцький,  
В. В. Колгац, А. Е. Лушкин, В. В. Шаповал, М. А. Якимов**

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем, Київ*

Сегодня низкотемпературная плазма используется не только при решении чисто научных задач, но и в конкретных производственных применениях. Таковыми являются: обработка плазмой твердых материалов (сварка, резка, профилирование, закалка, напыление, др.), обработка жидкостей плазмой, получение углеродных нано- частиц, реформирование углеводородов и многое другое. Многие из них возможны благодаря высокой химической активности плазмы. А с учетом ее высокой химической активности первоочередной задачей является повышение селективности химических процессов в плазмохимических системах. В связи с чем, существует повышенный интерес к возможности генерации неравновесной плазмы. При этом следует учитывать, что экзотермические химические процессы оказывают отрицательное влияние на поддержание достаточного уровня неравновесности в плазмохимической системе. Ранее было показано, что выделяемая химическая энергия в основном идет на увеличение тепловой энергии продуктов реакции. Возможным решением данной проблемы может быть использование плазмокаталитического подхода. В этом подходе плазма выступает в роли своеобразного катализатора, источника активированных необходимых образом, только некоторых из исходных, реагентов.

Химические реакторы имеют сравнительно большие объемы и встраивае-

мые в них источники плазмы должны генерировать потоки активных частиц достаточно большого сечения. Это необходимое условие вызывает ряд технических трудностей, которые и сейчас до конца не решены. Прежде всего, это создание широко-апертурных генераторов плазмы атмосферного давления имеющих длительный ресурс работы и эффективно инжектирующие активированные частички исходных реагентов в реакционный объем. Перспективным подходом, позволяющим существенно увеличить технологический ресурс плазменного генератора, является использование скользящих разрядов. Среди известных скользящих разрядов позволяющих генерировать квазистационарные потоки плазмы больших сечений, являются торцевые вращающиеся скользящие разряды, которые практически не исследованы. Принципиальной их отличительной особенностью, является обдув токового канала разряда газовым потоком со сравнимыми азимутальной, радиальной и осевой компонентами скорости.

Некоторые результаты исследований, с использованием скоростной видеокамеры NIKON D7100 и эмиссионной спектроскопии (в УФ и видимой области спектра), генератора плазмы на основе торцевого вращающегося скользящего разряда будут представлены в данной работе. Исследования выполнены при истечении обдуваемого газа, как в открытое полупространство, так и в ограниченное цилиндрической диэлектрической поверхностью большого диаметра. При этом торцевой конец цилиндрической поверхности мог быть открытым или закрытым металлическим фланцем с центральным отверстием малого диаметра.

В качестве плазмообразующих газов были воздух, азот, углекислый газ, аргон, водяной пар.

## **ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ ОКИСНИК/ВУГЛЕВОДЕНЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛАЗМОВО-КАТАЛІТИЧНОГО РЕФОРМУВАННЯ ВУГЛЕВОДНІВ**

**І. І. Федірчик<sup>1</sup>, О. А. Недибалюк<sup>1</sup>, В. Я. Черняк<sup>1</sup>,  
Е. В. Мартиш<sup>1</sup>, В. П. Демчина<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Київський національний університет імені Тараса Шевченка*

<sup>2</sup> *Інститут газу НАН України, Київ*

Динамічні плазмові системи, в яких плазма генерується завдяки електричним розрядам з поперечним газовим потоком, є простими та ефективними джерелами активних компонент, які ініціюють та прискорюють хімічні перетворення; зокрема, їх можна використати в процесах перетворення «зелених» вуглеводнів у синтез газ [1, 2]. Синтез газ є цінним продуктом розкладу вуглеводнів, який можна ефективно використовувати для отримання енергії або як сировина для синтезу рідких палив та різноманітних органічних речовин, як от пестициди, розчинники, клеї, фарби тощо. Процеси, під час яких актив-

ні частинки, які напрацьовуються в плазмі, виконують роль каталізатора хімічних перетворень, називаються плазмово-каталітичними [3]. Досягнення максимальної енергетичної ефективності та контролю за перебігом реакцій в плазмово-каталітичних процесах можливе у випадку генерування нерівноважної неізотермічної плазми. Дослідження показали, що перебіг екзотермічних реакцій в плазмі електричного розряду веде до вирівнювання температур заселення збуджених коливних та обертових рівнів компонент плазми та втрати нею неізотермічності. Для того, щоб цього уникнути, була розроблена система, в якій забезпечено роздільну подачу в хімічний реактор активованого плазмою окисника та суміші вуглеводень-окисник. Плазма в системі генерується за допомогою обертового ковзного розряду. Було показано, що система забезпечує високу ефективність перетворення «зелених» вуглеводнів, таких як етанол та рослинна олія, в синтез газ.

Було проведено дослідження залежності параметрів реформування у розробленій системі від співвідношення між потоками активованого плазмою та неактивованого окисника. Для визначення складу продуктів реформування було використано газову хроматографію та мас-спектрометрію; калорійність продуктів реформування визначалася за допомогою прокаліброваного калориметра.

Визначено залежність ефективності реформування модельного вуглеводню (етанол) від співвідношення між потоками активованого та неактивованого окисника. Встановлено характер впливу зміни співвідношення між активованим та неактивованим окисником на склад продуктів реформування етанолу та їхню калорійність. Показано, що ефективність реформування етанолу в динамічній плазмовій системі з обертовим ковзним розрядом складає 80% та є близькою до її теоретично можливого максимального значення, яке для розглянутої системи складає 85 ÷ 92 %. Дослідження показало, що коефіцієнт трансформації електричної енергії дорівнює найоптимальнішому теоретично розрахованому значенню ( $\alpha = 100$ ) для реакцій з частковим окисненням етанолу в синтез газ. Показано, що процес плазмово-каталітичного реформування модельного вуглеводню може протікати тоді, коли етанол знаходиться у газоподібному стані; для збільшення ефективності конверсії та коефіцієнта трансформації електричної енергії є доцільним подавати етанол не у вигляді рідини, а у вигляді пари.

Робота виконана за часткової підтримки Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Міністерства освіти і науки України та Національної академії наук України.

1. Czernichowski A. et al. // 19<sup>th</sup> Int. Symp. on Plasma Chemistry, 2009.
2. Du C. et al. // Int. J. of Hydrogen Energy. - 2015. - Vol. 40. - P. 12634.
3. Fridman A. // Plasma Chemistry. - 2008.

## ЗАЛЕЖНІСТЬ ЧАСУ ЖИТТЯ ЕЛЕКТРОНІВ У ЩІЛЬНІЙ ПЛАЗМІ ВІД ЇЇ ПАРАМЕТРІВ

О. А. Федорович, Л. М. Войтенко

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Наведено результати експериментального визначення середнього часу життя заряджених частинок (електронів та іонів) в щільній плазмі (ЩП) імпульсних розрядів у воді. Було показано, що час життя заряджених частинок у ЩП, практично не міняється в часі при зміні параметрів плазми розряду в широкому діапазоні. При цьому концентрація електронів міняється в діапазоні  $10^{15}$  -  $10^{22}$  см<sup>-3</sup>, а температура змінюється від  $7 \cdot 10^3$  К до  $64 \cdot 10^3$  К. Поясненням цього явища може служити те, що в щільній плазмі виникають великі флуктуації мікрополів і це призводить до «нереалізація рівнів» у спектрах випромінювання (поглинання) і до сильного розширення рівнів. Це приводить до того, що зменшується, кількість рівнів на які можлива рекомбінація. Таке зменшення числа вільних електронних станів збудженого атома (іона) сильно зменшує коефіцієнт рекомбінації в щільній плазмі й повинно приводити до збільшення часу життя електронів (іонів) у щільній плазмі. Вивчення впливу параметрів плазми на часи життя заряджених часток у щільній плазмі й присвячена дана робота. Параметри установки на якій проводились дослідження були такими: ємність – 14,5 мкФ; індуктивність контуру 0,47 мкГн; напругу на конденсаторній батареї змінювали від 3 кВ до 37 кВ; запас енергії до 10 кДж; струм в першому максимумі досягав 160 кА; довжина розрядного проміжку змінювалась від 5 мм до 100 мм. Розряд, для одержання повторюваності результатів, ініціювався вибухом тонких металевих (з чистих металів, та сплавів) або вуглецевих провідників, якими до розряду закорочувався розрядний проміжок. Це дало змогу також одержувати досить високі параметри плазми, які не можна одержати при чисто іскрових розрядах у воді. Для аналізу динаміки виникнення й зникнення заряджених часток у плазмі імпульсного розряду у воді використаємо рівняння балансу часток у воднево-кисневій плазмі високовольтних імпульсних розрядів у воді. Рівняння балансу часток у каналі [1]:

$$\frac{dN_e}{dt} = N_e \cdot N_a \cdot \beta - \alpha \cdot N_e^2 \cdot N_i, \quad (1)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт рекомбінації,  $\beta$  - коефіцієнт іонізації,  $[\alpha] = \text{см}^6/\text{с}$ ,  $[\beta] = \text{см}^3/\text{с}$   
 $N_e, N_i, N_a$  – концентрації електронів, іонів, атомів, формальний коефіцієнт рекомбінації  $\alpha^* = N_e \cdot \alpha$   $[\alpha^*] = \text{см}^3/\text{с}$ .

Середній час життя іона або електрона при чистій рекомбінації в об'ємі плазми (при знехтуванні іонізацією) можна визначити з рівняння [2]:



$$\frac{dN_{e,i}}{dt} \approx \frac{N_{e,i}^0}{\tau_{ж}} \approx \alpha_{e,i}^* (N_{e,i}^0)^2 \quad (2),$$

звідки

$$\tau_{ж} \approx \frac{1}{N_a \cdot \beta - \alpha^* \cdot N_e} = \frac{\Delta t \cdot N_e^0}{\Delta N_e}.$$

Результати роботи [3], одержані при дослідженнях імпульсного іскрового розряду в водні, узгоджуються з результатами даної роботи, а одержаний діапазон часів життя розширюється до верхньої температури 64 000 К і до нижньої концентрації електронів  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Розраховані по формулах для потрійної рекомбінації часи життя від трьох до шести порядків менші, ніж одержані експериментально.

1. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. - М.: Наука, 1982.
2. Чернетский А.В. Введение в физику плазмы. - М.: Атомиздат, 1969.
3. Малкин О.А. Импульсный ток и релаксация в газе. - М.: Атомиздат, 1974.

### **ЗБУДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ В РІДКОФАЗНОМУ АКУСТИЧНОМУ ЦИЛІНДРИЧНОМУ РЕЗОНАТОРІ МІКРОСЕКУНДНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ РОЗРЯДОМ**

**В. В. Юхименко<sup>1</sup>, В. Я. Черняк<sup>1</sup>, О. А. Федорович<sup>2</sup>, М. Ю. Голстих<sup>2</sup>,  
О. А. Недибалюк<sup>1</sup>, Д. К. Гамазін<sup>1</sup>, Є. В. Мартиш<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Для зеленої хімії є перспективними процеси в надкритичних флюїдах (води, вуглекислого газу). Вода в надкритичних умовах необмежено змішується з киснем, воднем і вуглеводнями, полегшуючи їхню взаємодію один з одним. Отримати такі надкритичні умови в рідинах можна в плазмово-рідинних системах з імпульсним розрядом. Використання імпульсного електричного розряду в рідині зумовлює появу нових чинників: сильне ультрафіолетове випромінювання, акустичні або навіть ударні хвилі. Крім того, акустичні коливання в таких системах можуть бути використані в якості додаткового механізму впливу на хімічні перетворення.

Можливо, найбільш перспективним методом збудження акустичних хвиль є генерація їх за допомогою осьового імпульсного електричного розряду із наступним відбиттям від ідеальної циліндричної поверхні, що може забезпечити кращу симетрію стиснення збіжної акустичної хвилі, як в газі так і в рідині. Дослідженням такого підходу присвячена дана робота.

Дослідження проводились в плазмово-рідинній системі циліндричної гео-

метрії з осьовим імпульсним розрядом. Система представляла собою широкий циліндр малої висоти  $H = 1$  см та радіусом  $R = 13,5$  см. При такій конструкції характерний радіус плазмового каналу -  $r$  був набагато меншим, ніж радіус реактору  $R$ .

Проведені дослідження показали, що при використанні системи в режимі роботи з поодинокими імпульсами і використанні однієї зарядної ємності спостерігається наявність першої, другої та третьої розбіжних хвиль однакової амплітуди. Якщо використовувати, для генерації акустичних хвиль, серію імпульсів – це призводить до пригнічення амплітуд другої та третьої розбіжних акустичних хвиль. Це може бути пов'язано з тим, що кожен наступний імпульс, створюючи розбіжну акустичну хвилю, руйнує фронт збіжної хвилі і, в результаті, коливання швидше затухають. Крім того при використанні серії імпульсів, в системі, утворюється значна кількість газу, що призводить до суттєвих неоднорідностей розповсюдження акустичних хвиль. Деградація другої та третьої розбіжних акустичних хвиль відбувається і при використанні, декількох ємностей з'єднаних паралельно для збільшення енергії, що вкладається в розряд. Паралельне з'єднання ємностей призводить до збільшення паразитних індуктивностей в системі, яка стає штучною лінією з відповідними затримками сигналів на виході, що призводить до затягування фронту струмового імпульсу та відповідного зменшення інтенсивностей акустичних коливань.

У результаті проведених досліджень було показано, що для найбільш ефективної генерації акустичних хвиль треба використовувати одну ємність і збільшувати вклад енергії в імпульс за рахунок підвищення зарядної напруги. В такому випадку (використання однієї ємності) спостерігається наявність першої, другої та третьої розбіжних акустичних хвиль близьких амплітуд.

## **СТВОРЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПЛАЗМИ НА БАЗІ ОБЕРТОВО-КОВЗНОГО РОЗРЯДУ ДЛЯ СИНТЕЗУ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ**

**К. В. Юхименко, Ю. П. Веремій, В. Я. Черняк**

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

Для широкого застосування наноматеріалів в сучасних технологіях необхідно покращити умови генерації їх, зокрема – організувати неперервний процес утворення та винесення наноматеріалів за межі робочої системи, спростити процес очищення та забезпечити систему джерелом активованої сировини з тривалим терміном експлуатації. Ці умови було частково виконано в системі з розрядом між двома твердими електродами в суміші інертного газу та аерозолі рідких вуглеводнів. Були проведені дослідження розрядної системи типу «торнадо» зі зворотно-вихровим потоком газу, реалізованої для синтезу вуглецевих наноматеріалів (ВНМ). У випадку, коли електроди були виготовлені з нержавіючої сталі, при роботі системи з постійною напругою

на аноді утворюється вуглецевий депозит. Утворення депозиту в міжелектродному просторі призводить до зменшення відстані між електродами практично до замикання, та до порушення коректної роботи системи. Щоб цього уникнути ми перейшли до режиму зі змінною напругою. Це дало змогу досягти практично неперервного режиму роботи в умовах поставленої задачі генерації вуглецевих наноматеріалів. У цілому, перехід до режиму зі змінними параметрами розряду має ряд переваг саме для подолання технологічних недоліків плазмових систем, але при цьому існує проблема створення джерел живлення змінного струму або напруги потрібної потужності. Для певного кола технологічних застосувань, очікувано, практично не має різниці частота змінних характеристик розряду, а лише принципова відмінність від систем постійного живлення. Зокрема, перехід від режиму з постійною напругою до режиму зі змінної напругою на розряді не відображається на емісійних спектрах плазми, що доводить незмінність умов для плазмової конверсії вуглеводневих сполук. Тому, нами було обране до використання стандартне низько-частотне джерело живлення з робочою частотою 50 Гц. Такі джерела живлення є стабільними в роботі з електричними розрядами та можуть бути використані для задач пов'язаних з конверсією вуглеводневих речовин.

Щоб збільшити контакт плазми, що активує аерозоль етанолу, з пиловими частинками, а також забезпечити триваліший час життя електродів було вперше реалізовано широкоапертурний торцьовий ковзний обертовий розряд змінного струму. Було відмічено, що утворення ВНМ в такій системі відбувається при значно нижчій температурі піролітичної камери та, навіть, за відсутності центрів росту, що не спостерігалось при попередніх реалізаціях інжекторів плазми.

## **КІНЕТИЧНІ МОДЕЛІ ВТРАТ ВИСОКОЕНЕРГІЙНИХ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ІЗ ПЛАЗМИ ТОКАМАКА**

**В. О. Яворський<sup>1</sup>, В. Я. Голобородько<sup>1</sup>, А. А. Гурін<sup>1</sup>, К. Шопф<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут теоретичної фізики, Інсбруцький університет, Інсбрук, Австрія*

Розроблено модель Фокера - Планка для дослідження функції розподілу швидких іонів, що втрачаються в аксіально симетричних тороїдних магнітних конфігураціях. Отримано 4-вимірне дрейфове Фокер - Планкове кінетичне рівняння для функції розподілу іонів, що втрачаються, в тривимірному просторі інваріантів руху та однією циклічною кутовою координатою. Це рівняння враховує радіальний перенос енергійних іонів, що обумовлений їхнім пітч-кутовим розсіянням та гальмуванням, при довільній ширині орбіт та скінченних гіро-радіусах. Сформульовано двовимірну крайову задачу для вивчення енергетичних та пітч-кутових розподілів втрачених іонів у випадку аксіально симетричної першої стінки.

У роботі також розглянуто деякі кінетичні моделі, що застосовуються в розрахунках руху частинок у плазмі методом Монте - Карло. Показано, що відповідність кінетичної та мікроскопічної стохастичної теорій пов'язана з коректністю врахування тертя й випадкової складової прискорення частинок в рівняннях Ланжевена. Отримані рівняння можуть бути покладені в основу розрахунків, які гарантують мінімальні розбіжності результатів, одержаних методом Монте - Карло та з розв'язку кінетичного рівняння Фокера - Планка.

Проведено порівняльний аналіз розрахунків втрат отриманих за використання рівняння Фокера - Планка та методу Монте - Карло.

## **МІРА ФАЗОВОГО ОБ'ЄМУ ГАМІЛЬТОНОВОЇ СИСТЕМИ, ЩО ПЕРЕМІШУЄТЬСЯ МНОЖИННИМИ ХВИЛЯМИ**

**Ю. В. Яковенко<sup>1,2</sup>, М. Г. Тищенко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Національний університет «Києво-Могилянська академія», Київ*

Нещодавно було знайдено [1], що множинні альфвеніві нестійкості можуть підсилювати перенесення енергії в токамаках, відбираючи енергію від струменя швидких іонів і каналуючи її до іншої просторової області плазми; цей механізм може пояснювати експерименти у сферичному торі NSTX, у яких температура плазми падала зі зростанням потужності нагрівання [2]. Це ставить питання про максимальну потужність, яку можуть відібрати хвилі від іонів, що їх збуджують. Щоб її знайти, треба оцінити енергію, яку хвилі відбирають у одної частинки під час її гальмування. Здається природним припустити, що ця енергія наближено дорівнює повній енергетичній ширині зон фазового простору, які перемішуються хвилями за відсутності гальмування (тобто резонансних островів та зон стохастичного руху). Аналіз передачі енергії від струменя швидких іонів до хвилі за наявності лише одного резонансу, який проведено в роботі [3], показує, що це припущення є правильним принаймні у тому випадку, коли пітч-кутове розсіювання іонів є нехтовним.

У цій роботі ми знаходимо числовим моделюванням те, як сумарна міра областей перемішування у фазовому просторі, які створюються множинними збуреннями, залежить від кількості та амплітуди збурень. Задля простоти ми обмежуємось розглядом модельної гамільтонової системи з одним ступенем вільності.

1. *Kolesnichenko Ya.I., Yakovenko Yu.V., Lutsenko V.V. // Phys. Rev. Lett. - 2010. - Vol. 104. - P. 075001.*
2. *Stutman D. et al. // Phys. Rev. Lett. - 2009. - Vol. 102. - P. 115002.*
3. *Berk H.L., Breizman B.B. // Phys. Fluids B. - 1990. - Vol. 2. - P. 2235.*

## **Тези доповідей з радіобіології та радіоекології**

### **ЗНИЖЕННЯ ДОЗОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ПАЦІЄНТІВ ПРИ РЕНТГЕНОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ**

**Л. І. Асламова, Н. С. Мірошніченко, Н. В. Меленевська, Є. В. Куліч**

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

На сьогоднішній день проблема підвищеного дозового навантаження, яке отримує населення від різних видів радіаційного опромінення, досягла критичного значення. Цьому сприяє впровадження новітніх діагностичних методів, таких як комп'ютерна томографія, позитронно-емісійна томографія тощо, які використовують джерела іонізуючого випромінювання (ДІВ) для обстеження та виявлення різноманітних патологій. Такі діагностичні процедури, дають змогу підвищити рівень якості медичних послуг та надати необхідну інформацію, щодо можливості хірургічного втручання та/або лікування онкологічних хворих. За даними світової статистики щорічно проводиться 4 млрд. рентгенодіагностичних обстежень. В Україні майже 95 % таких обстежень становлять рентгеноскопія, рентгенографія та профілактична флюорографія, також нараховується 3 тис. медичних установ, в тому числі стоматологічних, діяльність яких вимагає застосування ДІВ.

Основною проблемою на шляху вирішення задачі зниження дозового навантаження є отримання рентгенівських знімків з високим рівнем шумів, що призводить до зниження можливості виявлення певних патологічних структур, таких як дрібні кальцифікати, тонкі судини тощо[1].

Комісія Європейських Співтовариств (КЕС) розробила ряд рекомендацій щодо належної радіографічної практики та представила критерії зображення з метою отримання високоякісних зображень при залученні якомога низьких доз, які отримує пацієнт [2].

У роботі визначені розбіжності між міжнародними документами та вітчизняною законодавчо-нормативною базою з питань забезпечення та контролю якості рентгенорадіологічних процедур, визначений ступінь застарілості матеріально-технічної бази рентгенорадіологічних відділень медичних закладів. Запропоновано шляхи зниження дозового навантаження при проведенні масового флюорографічного скринінгу органів грудної клітини з використанням цифрового рентгенодіагностичного комплексу (ЦРДК); вивчено можливості зниження дозового навантаження на пацієнтів середньої та надмірної ваги. Розроблено пропозиції щодо оптимізації компонентного складу ЦРДК та їх робочих параметрів. Запропоновано розробку задач для організації практичного навчання студентів-магістрів з медичної фізики, з використанням захищених навчально-дослідницьких цифрових рентгенівських комплексах.

1. *Bernhardt P., Baetz L., Ruehrnschopf E.P.* Spatial frequency-dependent signal-to-noise ratio as a generalized measure of image quality // Proc. SPIE. - 2005. - Vol. 5745. – P. 407 – 418.
2. *Commission of European Communities.* European Guidelines on Quality Criteria for Diagnostic Radiographic Images in Paediatrics, Report EUR 16261. EN, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. - 1996.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИТОГЕНЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ  
У ЛІМФОЦИТАХ ПЕРИФЕРІЙНОЇ КРОВІ ГРУПИ ЖИТЕЛІВ  
М. ЖОВТІ ВОДИ ТА АНАЛІЗ ЗАХВОРЮВАНOSTІ  
НАСЕЛЕННЯ МІСТА**

**Л. К. Бездробна<sup>1</sup>, Л. В. Тарасенко<sup>1</sup>, Т. В. Циганок<sup>1</sup>, Т. В. Мельник<sup>1</sup>,  
В. А. Курочкіна<sup>1</sup>, Н. М. Тарасьєва<sup>2</sup>, В. П. Главацька<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Спеціалізована медико-санітарна частина № 9, Жовті Води*

Місто Жовті Води Дніпропетровської області – центр з розвиненою уранопереробною і збагачувальною (а у період 1949 - 1990 рр. й видобувною) гірничою промисловістю. Населення проживає в зоні довготривалого техногенного радіаційного забруднення, що перевищує встановлені в Україні норми радіаційної безпеки.

Одним із методів оцінки впливу мутагенних чинників на людину є аналіз рівня і спектру цитогенетичних пошкоджень у культурі лімфоцитів периферійної крові.

З метою індикації впливу екологічної ситуації у м. Жовті Води на його жителів проведено цитогенетичне обстеження 42 умовно здорових осіб віком 19 - 59 років та 42 осіб із м. Києва підібраних за принципом аналогів (група порівняння), які не мали професійних контактів із радіаційним та іншими мутагенними чинниками, а також аналіз захворюваності у дорослого населення цих міст та України в цілому.

Показано, що у обстежених осіб із м. Жовті Води середня частота всіх цитогенетичних ефектів вірогідно перевищує таку у осіб із м. Києва: частота сумарних аберацій хромосомного типу на 70 %; частота нестабільних обмінів (дицентриків + центричних кілець) з фрагментом та без фрагменту у 3 та 2,6 рази відповідно. Наявність у спектрі аберацій хромосомного типу у жителів м. Жовті Води підвищеного рівня нестабільних міжхромосомних обмінів (специфічних маркерів опромінення) однозначно свідчить про істотний внесок радіаційного фактора в постійно триваючі процеси мутагенезу. Підтвердженням цього є і значимо підвищена у них частота вільних ацентриків та атипових моноцентриків (стабільних маркерів опромінення). Нестабільні міжхромосомні обміни виявлені в клітинах 74 % осіб із м. Жовті Води, у по-

ловини з них по декілька таких аберацій, а у групі порівняння – у 28 % осіб і не більше одного обміну. Осіб, у яких виявлено три і чотири нестабільних маркери опромінення, слід віднести до групи ризику і вони потребують підвищеного медичного нагляду. У осіб із м. Жовті Води виявлено і достовірно вищу, порівняно з киянами, частоту аберацій хроматидного типу, що свідчить про більш значну загальну нестабільність геному при впливі чинників нерадіаційної природи.

Аналіз рівня захворюваності у дорослого населення міст Жовті Води і Київ, а також України в цілому виявив, що в м. Жовті Води вища розповсюдженість всіх захворювань разом, всіх захворювань на злоякісні новоутворення і, зокрема, на новоутворення бронхо-легеневої системи (що займають перше місце в структурі онкопатології у місті).

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КІСТКОВОГО МОЗКУ МИШЕЙ У ПРОЦЕСІ ТРИВАЛОГО ЗОВНІШНЬОГО ОПРОМІНЕННЯ**

**Р. В. Бойко, Д. І. Білько, І. З. Руссу, Н. М. Білько**

*Національний університет «Києво-Могилянська академія», Київ*

Функціональний стан популяції стовбурових клітин кісткового мозку відіграє винятково важливу роль у функціонуванні кровотворної системи організму в процесі його тривалого опромінення. У зв'язку з цим питанням дослідження кількісних змін популяції колонієутворюючих одиниць (КУО), механізмів компенсації загибелі клітин при опроміненні присвячена значна кількість експериментальних робіт [2 - 5].

Метою цієї роботи є побудова математичної моделі та дослідження механізмів компенсації кровотворної функції на рівні популяції КУО кісткового мозку на основі аналізу даних експериментальних досліджень кінетики КУО у процесі тривалого фракціонованого та неперервного зовнішнього опромінення.

Основою для побудови такої моделі слугувала математична модель функціонування системи кровотворення [1], що базується на схемі кровотворення, запропонованій Чертковим Й. Л. та співавторами [4].

За допомогою побудованої математичної моделі з використанням експериментальних результатів щодо впливу тривалого неперервного опромінення з потужністю дози 0,01, 0,03, 0,06, 0,1, 0,25, 0,5, 0,8 Гр/добу (23 год на добу) та з потужністю дози 1, 3, 6, 10 Гр/добу (цілодобово) на чисельність КУО кісткового мозку мишей встановлено механізм формування стаціонарного стану кількості КУО у процесі опромінення, визначені рівні стабілізації їх чисельності залежно від щоденної дози опромінення.

За експериментальними даними, отриманими рядом дослідників [2, 3, 5], обчислено параметри, що характеризують реакцію кровотворної системи на втрату КУО через тривале опромінення за різних потужностей доз. Встанов-

лені кількісні показники зменшення інтенсивності надходження КУО із «джерел» до кісткового мозку при збільшенні щоденної дози опромінення.

Отже, у результаті проведеної роботи було побудовано математичну модель, що описує зміни відносної чисельності КУО у процесі тривалого опромінення з різними потужностями доз. Запропоновано метод чисельного визначення усіх параметрів моделі за результатами відповідних експериментальних даних. Значення функції, що описує зміни відносної чисельності КУО на певному етапі щоденного неперервного опромінення, лежать у межах встановлених експериментально в роботах [2, 3, 5] довірчих інтервалів.

За результатами аналізу математичної моделі встановлено процес формування за тривалого опромінення нового стаціонарного стану популяції КУО кісткового мозку, рівень якого визначається через параметри математичної моделі.

- 1 *Бойко Р.В., Білько Н.М., Білько Д.І.* // Кієво-Могилянський науковий вісник. Біологія. - 2010. - Т. 1. - С. 1 - 10.
- 2 *Калина И., Прасличка М.* // Радиобиология. - 1977. - Т. 17, вып. 6. - С. 849 - 854.
- 3 *Прасличка М.А., Калина И.* // Радиобиология. - 1976. - Т. 16, вып. 3. - С. 376 - 380.
- 4 *Чертков И.Л., Дерюгина Е.И., Левир Р.Д., Абрахим Н.Г.* // Успехи современной биологии. - 1991. - Т. 111, вып. 6. - С. 905 - 922.
- 5 *Kalina I., Praslicka M., Marko L., Krasnovska V.* // Fol. Biol. (Praha). - 1975. - Vol. 21 (3). - P. 165 - 170.

## **ТЕРМОСТАТОВАНА КАМЕРА ДЛЯ КОМБІНОВАНИХ РАДІОБІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

**В. М. Венедиктов<sup>1</sup>, Ю. С. Іванов<sup>2</sup>, В. А. Лібман<sup>1</sup>,  
Я. В. Пшеничний<sup>1</sup>, Ю. Б. Шевченко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ*

Останнім часом активно ведуться роботи з комбінованого застосування «класичних» та новітніх методів вирішення таких проблем класичної променевої терапії та хіміотерапії, як то медикаментозна стійкість, низька чутливість до  $\gamma$ - та  $\beta$ -терапії, високий ризик тяжких променевих пошкоджень. Для забезпечення досліджень в цьому напрямку на базі дослідницького реактора ВВР-М було розроблено, сконструйовано та виготовлено термостатовану камеру для опромінення біологічних об'єктів при заданій температурі.



Термостатована камера конструктивно складається з двох блоків: безпосередньо камери, де розміщуються опромінювані зразки, та електронного блоку керування.

У камері встановлені: нагрівач типу «фен», для нагрівання повітря та зразків, вентилятор для охолодження, світлодіоди для опромінення зразків фотонами оптичного діапазону, термopара для вимірювання та регулювання температури. Довжина хвилі та потужність світлового потоку визначаються типом світлодіодів. В даний час встановлені світлодіоди з довжиною хвилі в максимумі лінії випромінювання 630 нм. Діоди зорієнтовані таким чином, що зона рівномірного освітлення з потужністю приблизно 100 мВт/см<sup>2</sup> перекриває зону рівномірного опромінення нейтронами на установці ГЕК-5 дослідницького реактора ВВР-М.

Електронний блок керування має семисегментний світлодіодний індикатор та кнопки керування. Він виконує наступні функції:

- встановлення часу вимірювання без червоного світла з індикацією у хвилинах;
- встановлення часу вимірювання з червоним світлом з індикацією у хвилинах;
- встановлення базової температури, яка буде підтримуватися в камері;
- підтримання заданої температури в камері з точністю  $\pm 0,5$  °С від базової шляхом нагріву або охолодження;
- вмикання та вимикання червоного світла у встановлений час;
- режим відкладеного старту.

Камера призначена головним чином для використання в складі опромінювальної установки на горизонтальному експериментальному каналі ядерного реактора ВВР-М, або з іншим джерелом  $\gamma$ - або  $\beta$ -променів. У такій комбінації камера забезпечує встановлення часу опромінення зразків нейтронами на реакторі або  $\gamma$ -променями від іншого джерела, а також часу опромінення червоним світлом одночасно з іонізуючим опроміненням, або з наперед заданим інтервалом між опроміненнями.

Таким чином, конструкція камери дає змогу проводити дослідження з нейтронозахватної терапії, фотодинамічної терапії,  $\gamma$ -терапії, моделювання гіпертермії та комбінації названих методів.

Камера була випробувана як у автономному режимі, так і у складі опромінювальної установки на ГЕК-5 реактора ВВР-М при одночасному і почерговому опроміненні зразків фібробластоподібних клітин L<sub>929</sub> нейтронами та червоним світлом при заданій температурі.

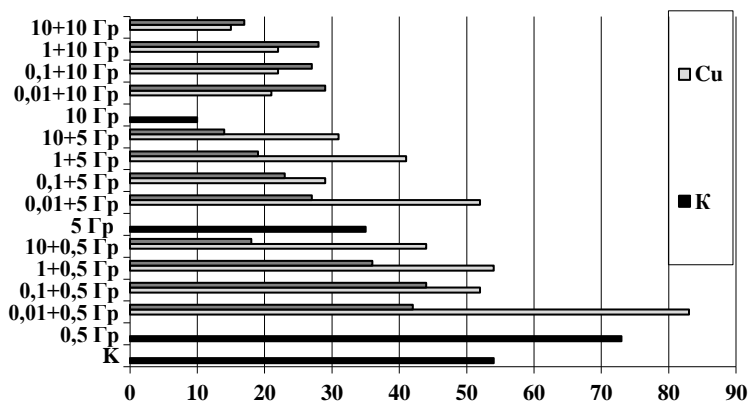
# КОМБІНОВАНА ДІЯ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ІОНІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА ЖИТТЄЗДАТНІСТЬ КУЛЬТУРИ КЛІТИН ЛІНІЇ L<sub>929</sub>

Д. Д. Гапєєнко, Г. Й. Лавренчук

*Державна установа*

*«Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України», Київ*

Важливою екологічною проблемою сьогодення є використання хімічних речовин та джерел іонізуючого випромінювання (ІВ) в різних галузях промисловості, медицини та науки. Експериментальне дослідження клітинних реакцій показало, що інкубація клітин з іонами важких металів різної концентрації викликала зміни їх морфофункціональних характеристик: дозозалежне зменшення щільності клітинної популяції на тлі істотного інгібування мітотичної активності клітин в культурах з іонами нікелю та підвищеної мітотичної активності клітин в культурах з іонами міді. Встановлено, що в культурах клітин з іонами міді, на відміну від іонів нікелю, статистично достовірно зростає кількість атипичних багатоядерних клітин (більш, ніж у 20 разів за концентрації міді 10 мкмоль/мл). Дослідження впливу іонів важких металів у діапазоні концентрацій від 0,01 до 10,00 мкмоль/л на кінетику росту, проліферативну та мітотичну активність клітин, опромінених іонізуючим випромінюванням дало змогу встановити полімодальний характер змін радіогенних клітинних реакцій.



Життєздатність клітин лінії L<sub>929</sub> на 5-ту добу культивування при комбінованій дії іонізуючого випромінювання в різних дозах та іонів важких металів міді і нікелю в різних концентраціях. На осі абсцис – кількість клітин на площі 0,05 мм<sup>2</sup> препарату. На осі ординат – варіант дослідю. Позначення на рисунку: К – інтактні клітини; 0,1 ÷ 10 – концентрація елемента, мкмоль/мл; 0,5, 5 та 10 Гр – доза опромінення.

Іони нікелю через свої генотоксичні властивості істотно зменшують мітохондріальну активність та посилюють апоптоз у культурі клітин, опромінених ІВ в дозах 0,5 та 5,0 Гр, проте в області сублетальних доз проявляють протекторний вплив на виживання та проліферативну активність клітин. Нутриєнтний мікроелемент мідь в області концентрацій 0,01 - 10,00 мкмоль/л не проявляє цитотоксичні властивості в культурах клітин, опромінених в дозах 0,5 та 5,0 Гр, проте ушкоджуючий ефект сублетальної дози 10,0 Гр не залежить від концентрації цього мікроелементу. Визначення кількості апоптотичних клітин при поєднаній дії ІВ та іонів міді показало складний, незалежний ні від дози, ні від концентрації характер їх вмісту в культурах, що може свідчити про компенсаторні процеси в клітинах за досліджуваних умов. Цитохімічне дослідження показало, що спільним для всіх іонів важких металів є посилення енергообміну в опромінених ІВ клітинах за рахунок активації гліколізу, що вказує на компенсаторний характер цих змін. Водночас, тільки для іонів нікелю характерне підвищення активності сукцинатдегідрогенази в діапазоні концентрацій 0,01 – 0,1 мкмоль/л.

1. *Ercal N., Gurer-Orhan H., Aykin-Burns N.* Toxic metals and oxidative stress part I: mechanisms involved in metal-induced oxidative damage // *Curr. Top. Med. Chem.* - 2001. - Vol. 1, No. 6. - P. 529 - 539.

## **АСОЦІАЦІЯ ПОЛІМОРФІЗМУ ГЕНІВ РЕПАРАЦІЇ ДНК *XRCC1* ТА *XPB* ТА РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ РАКУ ЩИТОПОДІБНОЇ ЗАЛОЗИ В ОСІБ, ЯКІ ЗАЗНАЛИ ДІЇ ІОНІЗУЮЧОЇ РАДІАЦІЇ ВНАСЛІДОК АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС**

**С. О. Генік-Березовська<sup>1</sup>, В. М. Шкарупа<sup>2</sup>, С. В. Клименко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ДУ “Інститут спадкової патології НАМН України”, Львів

<sup>2</sup> ДУ “Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України, Київ

Метою роботи було визначити та порівняти особливості поліморфізму генів репарації *XRCC1 Arg399Gln* та *XPB Lys751Gln* у хворих на рак щитоподібної залози (РЩЗ), які зазнали дії іонізуючої радіації внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, та у хворих без впливу іонізуючого випромінювання (ІВ) в анамнезі. Матеріали і методи. Визначення поліморфізму генів *XRCC1 Arg399Gln* та *XPB Lys751Gln* проводилось шляхом полімеразної ланцюгової реакції (ПЛР) у 102 хворих на РЩЗ: 38 осіб, які зазнали дії іонізуючої радіації внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС (учасники ліквідації наслідків аварії, евакуйовані та мешканці контрольованих територій, забруднених радіонуклідами), 64 особи без впливу іонізуючого випромінювання в анамнезі та

41 особа контрольної групи жителів України без онкопатології. Для порівняння отриманих даних щодо спонтанного та радіаційно-асоційованого РЩЗ та розрахунків відмінностей частот алелей і ризику виникнення онкопатології використовували дані літератури щодо контрольних груп популяцій Російської Федерації, Білорусії, Польщі [1, 2].

Результати. Вперше в Україні визначені частоти поліморфних алелей генів білків репарації пошкоджень ДНК – *XPD Lys751Gln* та *XRCC1 Arg399Gln* у хворих на РЩЗ, які зазнали дії іонізуючої радіації внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС (0,49 та 0,57 відповідно) та у хворих на РЩЗ без впливу ІВ в анамнезі (0,39 та 0,37 відповідно). При порівнянні з даними літератури щодо поліморфізму *XRCC1* у радіаційно-експонованих осіб без онкопатології, ризик розвитку РЩЗ у гомозиготних носіїв мінорного алеллю *XRCC1 Gln399Gln* у осіб, які зазнали впливу ІВ, виявився достовірно підвищеним:  $OR = 4,14$ ,  $p = 0,001$  (СІ 95 % 1,72 - 9,93). Частота мінорного алелю гена *XRCC1* у осіб, які зазнали впливу ІВ в анамнезі достовірно більша, ніж в групі порівняння ( $p = 0,006$ ). Для гомозиготних носіїв мінорних алелей гена *XRCC1 Gln399Gln*, які не зазнавали впливу ІВ в анамнезі, не виявлено збільшення ризику розвитку РЩЗ. При порівнянні з контрольною групою української популяції асоціації поліморфізму гена *XRCC1 Gln399Gln* з ризиком розвитку РЩЗ після дії іонізуючої радіації та ризику розвитку спонтанного РЩЗ не виявлено. У гомозиготних носіїв мінорних алелей гена *XPD Lys751Gln*, які зазнали впливу ІВ, виявлено збільшення ризику розвитку РЩЗ:  $OR = 3,30$ ,  $p = 0,05$  (СІ 95 % 0,82-14,14) при порівнянні з контрольною групою української популяції. При порівнянні з даними літератури асоціації поліморфізму гена *XPD Lys751Gln* з ризиком розвитку РЩЗ після дії іонізуючої радіації та ризику розвитку спонтанного РЩЗ не виявлено.

Висновки. Носійство гомозиготних мінорних алелей генів репарації ДНК *XRCC1 Gln399Gln* та *XPD Gln751Gln* є фактором ризику розвитку РЩЗ за умов впливу іонізуючого випромінювання в дослідженій групі української популяції.

1. Akulevich N.M., Saenko V.A., Rogounovitch T.I. et al. Polymorphisms of DNA damage response genes in radiation-related and sporadic papillary thyroid carcinoma // *Endocr. Relat. Cancer*. - 2009. - Vol.16, No. 2. - P. 491 - 503.
2. Sliwinski T. Common polymorphisms in the XPD and hOGG1 genes are not associated with the risk of colorectal cancer in a Polish population // *Tohoku J. Exp. Med.* - 2009. - Vol. 218. - P. 185 - 191.

# ХЕМІЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ КРОВІ ЩУРІВ ЗА МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНОГО НАДХОДЖЕННЯ ДО ОРГАНІЗМУ <sup>131</sup>I

**Ю. П. Гриневич, А. І. Липська, І. П. Дрозд, С. В. Телецька**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Робота є продовженням циклу комплексних радіобіологічних досліджень впливу радіоактивного йоду (<sup>131</sup>I) на стан окисного гомеостазу тварин. Мета роботи – дослідження динаміки перебігу перекисних процесів у крові щурів за моделювання аварійного надходження до організму <sup>131</sup>I. Експерименти проведені на статевозрілих щурах-самцях лінії Вістар масою 220 ± 30 г, які утримувались на стандартному раціоні. Розчин натрію йодиду з початковою активністю 30,32 кБк /тварину, що в подальшому зменшувалась за рахунок фізичного розпаду ізотопу, вводили перорально через зонд в один і той же час доби впродовж 14 діб. Кров із хвостової вени (0,2 мл) відбирали згідно із графіком експерименту. Інтенсивність перекисних процесів досліджували в гемолізатах за методом кінетичних хемілюмінесцентних характеристик (ХЛ-тест) на хемілюмінометрі Lum-5773. Обробку і аналіз даних здійснювали за допомогою ПК з використанням програмного забезпечення “Power Graph”. Вміст <sup>131</sup>I в органах і тканинах вимірювали на γ-спектрометрі з Ge (Li) детектором ДГДК–60. Динаміку накопичення ізотопу в кров’яному руслі відображено у таблиці.

## Вміст <sup>131</sup>I у крові щурів у різні терміни експерименту

| Термін після початку введення (доби) | 1          | 2          | 3          | 8          | 14         |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Питома активність крові, Бк/г        | 25,9 ± 3,9 | 42,7 ± 6,6 | 39,9 ± 5,9 | 42,7 ± 7,2 | 31,8 ± 3,8 |

Питомий вміст ізотопу в крові на 2-у добу досягав максимального значення і знаходився на цьому рівні до 8-ї доби включно. На 14-у добу реєстрували його суттєве зменшення.

Водночас, на 1-у та 2-у добу експерименту суттєвих змін, порівняно з контролем, світлосуми світіння ( $\Sigma_{300}$ ), амплітуди швидкого спалаху ХЛ ( $I_{\max}$ ) та часу досягнення ним максимальних значень ( $\tau_{\max}$ , с) не фіксували. Реєстрували лише зменшення вмісту антиоксидантів ( $I_{\text{кін}}$ ) та незначне зростання швидкості утворення вільних радикалів (ВР). На 3-ю добу спостерігли зменшення всіх показників ХЛ-реакції, окрім  $\tau_{\max}$  (що відображає співвідношення про- і антиоксидантів). Максимальне підвищення рівня перекисних процесів фіксу-

вали на 8-у добу: зростали  $\sum_{300}$ ,  $I_{\max}$  та швидкість утворення ВР, очевидно, за рахунок зменшення вмісту  $I_{\text{кін}}$  та  $\tau_{\max}$ . Такий розподіл зсуває рівновагу прооксидантно-антиоксидантного співвідношення вліво. Наприкінці експерименту (14-а доба) фіксували посилений викид у кров'яне русло антиоксидантів ( $I_{\text{кін}}$  збільшилась в 1,7 рази), що призвело до зменшення прооксидантно-антиоксидантного співвідношення ( $\sum_{300}$ ) та швидкості утворення ВР. Амплітуда максимальної інтенсивності свічення ( $I_{\max}$ ) та час досягнення ним максимальних значень ( $\tau_{\max}$ ) практично не змінювались.

Отримані результати свідчать, що за даних умов опромінення відбувалися фазні зміни у окисному гомеостазі тварин, які, однак, не впливають суттєво на перебіг перекисних процесів у крові.

## **ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ХРОМОСОМ В ОПРОМІНЕНИХ *IN VITRO* ЛІМФОЦИТАХ ПЕРИФЕРИЧНОЇ КРОВІ ПІДЛІТКІВ**

**О. М. Демченко, О. О. Талан, О. В. Шеметун**

*ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України, Київ*

Підвищення радіаційного фону за рахунок впровадження ядерних технологій в медицині, науці і промисловості, ядерних аварій спричинило зростання радіаційного навантаження на організм людини. Опромінення в малих дозах, навіть низької потужності, може призводити до зниження компенсаторно-приспосувальних механізмів організму людини, зриву його адаптаційних можливостей, порушення цілісності геному й розвитку канцерогенезу. Слід зазначити, що більшість досліджень з радіаційно-індукованого мутагенезу виконано з залученням осіб середнього віку. Враховуючи, що при радіаційних аваріях дії опромінення можуть піддаватись значні контингенти населення різного віку, особливий інтерес викликає дослідження і встановлення радіочутливості організму людини у підлітковому віці, коли відбувається становлення його ендокринного статусу, що може впливати на перебіг репараційних процесів і стабільність геному.

Враховуючи зазначене, метою роботи було встановлення частоти та спектру аберацій хромосом в лімфоцитах периферичної крові підлітків за дії рентгенівського випромінювання *in vitro* в малій дозі.

З використанням методу GTG забарвлення метафазних хромосом проведено цитогенетичне обстеження 20 осіб віком 12-16 років, які постійно проживали в Києві і заперечували свідомий контакт з іонізуючою радіацією та іншими мутагенами. З метою визначення радіаційно-індукованого цитогенетичного ефекту в лімфоцитах периферичної крові досліджуваних осіб зразки цільної крові було опромінено *in vitro* рентгенівськими променями в дозі 0,25 Гр.

Цитогенетичний аналіз опромінених *in vitro* в дозі 0,25 Гр лімфоцитів пе-

риферичної крові підлітків показав, що середньогруповий рівень аберацій хромосом у них ( $5,84 \pm 0,53$  на 100 клітин) достовірно перевищував контрольний ( $p < 0,001$ ). Індивідуальні значення радіаційно-індукованих пошкоджень хромосом знаходились в межах від 3,00 до 9,68 на 100 клітин. Рівень аберацій хроматидного типу (хроматидних розривів) не мав істотної різниці з відповідним показником в неопромінених лімфоцитах ( $p > 0,05$ ). Пошкодження хромосомного типу були представлені термінальними та інтерстиціальними делеціями, транслокаціями, дицентричними і кільцевими хромосомами. Нестабільні маркери опромінення становили 50% від загальної кількості аберацій хромосомного типу. Вони зустрічались з частотою  $2,33 \pm 0,34$  на 100 метафаз, що достовірно перевищувала таку в контролі ( $p < 0,001$ ). Рівень стабільних маркерів дії радіації (транслокацій) в опромінених лімфоцитах становив  $0,78 \pm 0,20$  на 100 клітин і перевищував відповідний показник при спонтанному мутаційному процесі ( $p < 0,01$ ).

Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено спектр і частоту аберацій хромосом в опромінених *in vitro* в дозі 0,25 Гр лімфоцитах периферичної крові підлітків. Показано, що статистично достовірне зростання вихідного рівня аберацій хромосом при опроміненні в малій дозі відбулось за рахунок аберацій хромосомного типу, індукція яких притаманна для дії іонізуючого випромінювання. В спектрі аберацій хромосомного типу переважали нестабільні маркери дії радіації (дицентричні та кільцеві хромосоми).

## **ДИНАМІКА НАКОПИЧЕННЯ $^{131}\text{I}$ ТА ФОРМУВАННЯ ПОГЛИНЕНИХ ДОЗ ЗА ЗМІННОГО ТРИВАЛОГО ПЕРОРАЛЬНОГО НАДХОДЖЕННЯ ДО ОРГАНІЗМУ ЩУРІВ**

**І. П. Дрозд, А. І. Липська, О. А. Сова**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Досліджували особливості кінетики  $^{131}\text{I}$  та дозоутворення в органах і тканинах лабораторних щурів лінії Вістар за надходження, що імітує результати «залпового» аварійного викиду ізотопу у довкілля. Експеримент проводили на статевозрілих щурах-самцях лінії Вістар, масою  $240 \pm 30$  г. Тварин умертвляли (по 5 на кожну точку) згідно із графіком експерименту. Вміст ізотопу в органах і тканинах визначали  $\gamma$ -спектрометричним методом із застосуванням напівпровідникового детектора. Статистичну обробку результатів виконували за критеріями Стьюдента та  $R^2$ , використовуючи програмний пакет STATISTICA.

Активність ізотопу, що дозовано перорально індивідуально вводили тваринам, під час першого введення становила  $32,3$  кБк/тварину. Надалі її щоденно зменшували на величину добового радіоактивного розпаду йоду. Процес накопичення радіойоду в щитоподібній залозі (ЩЗ) описується трьома змінними взаємопов'язаними дозозалежними параметрами: ефективним пері-

одом напіввиведення  $T_{ef}$ , коефіцієнтом депонування у ЩЗ  $k_{th}$  та масою останньої  $m_{th}$ . Запропоновано методичні підходи до ідентифікації та оптимізації цих параметрів. Виявлено, що доза, яка накопичується у ЩЗ до досягнення значення 350 Гр, лінійно співвідноситься зі значенням добової активності, що початково надходить до організму. За досягнення поглиненої у ЩЗ дози понад 350 Гр лінійність втрачається, а отриману криву можна описати поліномом високого порядку. Встановлено граничну поглинену дозу, за якої ЩЗ перестає функціонувати і відбувається майже повна деструкція тироїдної тканини. Величина цієї дози становить  $1600 \pm 35$  Гр. Залишкова маса тканини ЩЗ після радіаційного руйнування органу і повної втрати ним функціональної здатності становить близько 1 % від маси неушкодженої тканини.

Досліджено процеси накопичення радіоїоду та дозоутворення в інших органах і тканинах. Накопичення характеризується, переважно, логарифмічною чи показниковою (експоненційною) залежністю від терміну надходження до органу. При цьому доза опромінення тимуса на 2, шлунку та гіподерми на 3, інших органів – на 4, а м'язової тканини – на 5 порядків величини менші, ніж ЩЗ. Розкрито особливості формування поглинених доз з урахуванням безпосереднього опромінення радіонуклідами, що надходять до органу чи тканини та додаткового  $\gamma$ -опромінення радіонуклідами, що містяться у критичних органах: ЩЗ і шкірі. Показано, що доза додаткового опромінення деяких органів, які безпосередньо прилягають до ЩЗ (наприклад, тимус), може на 1 - 2 порядки величини перевищувати таку від безпосереднього внутрішнього опромінення і суттєво впливати на функціонування кровотворної та імунної систем.

## **ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ РОЗРАХУНКУ ПОГЛИНЕНОЇ ДОЗИ ЗА ОДНОРАЗОВОГО НАДХОДЖЕННЯ ДО ОРГАНІЗМУ ЩУРІВ <sup>131</sup>I**

**І. П. Дрозд, А. І. Липська, В. І. Пастушенко, М. В. Найчук**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Запропоновано оригінальні алгоритми розрахунку поглинених доз у щитоподібній залозі (ЩЗ) та тимусі щурів за одноразового надходження <sup>131</sup>I, які дають змогу максимально спростити розрахунковий процес і, водночас, забезпечують високу достовірність розрахунків у діапазоні вхідних активностей 1 - 115000 Бк. Суть оптимізації полягає у виявленні, на підставі базових експериментальних даних, функціональних залежностей формування дози в органі від величини введеної активності та використання їх для написання програми розрахунку доз. У якості базових даних використовували результати експериментальних досліджень динаміки утримання ізотопу в ЩЗ тварин за трьох одноразово введених активностей: 3300, 19200 та 114800 Бк [1, 2]. Використовуючи отримані експериментальні дані, для кожної введеної акти-



вності будували функції  $Q_{sp}(t)$ , що є простими експонентами; визначали їхні характеристики (коефіцієнт переходу йоду з шлунково-кишкового тракту до ЩЗ -  $k_{th}$  і ефективний період напіввиведення із ЩЗ -  $T_{ef}$ ), які є змінними (дозозалежними); після чого впродовж 80 діб з кроком 1 доба за класичною формулою розраховували дози та будували залежності  $D(t)$ . Визначили, що функція залежності  $T_{ef}$  (у добах) від уведеної активності  $Q$  має вигляд  $T_{ef} = 0,6435 \cdot \ln(Q) - 2,805$ , якщо  $Q \geq 1800$  Бк і  $T_{ef} = 2$  за  $Q < 1800$  Бк, а коефіцієнт переходу з ШКТ до ЩЗ  $k_{th} = Q^{-0,03075}$  у діапазоні  $0 < Q < 150000$  Бк;  $\lambda_{ef} = 0,693/T_{ef}$ . Аналізуючи криві формування дози, виявили, що їх доцільно розбити на дві ділянки:  $1 \div (14 - 20)$  і  $(14 - 20) \div 80$  діб. На кожній ділянці процес формування дози описується логарифмічною функцією але з різною швидкістю зростання

$$D(t) = a \cdot \ln(t) + b, \quad (1)$$

де  $a$  та  $b$  константи, значення яких залежить від введеної активності.

Границя між ділянками (у цілих добах), залежно від введеної активності, визначається із виразу  $t = 1,51 \cdot \ln(Q) + 2,68$  за  $Q \geq 1800$  Бк та  $t = 14$  діб за  $Q < 1800$  Бк.

З метою визначення значень коефіцієнтів  $a$  та  $b$  для кожної ділянки для трьох введених активностей будували графіки залежності дози від терміну після надходження ізотопу. Надалі будували залежності  $a$  (множники при логарифмах) та  $b$  (вільні члени) від введеної активності. Для усіх значень вхідної активності ці залежності описувались лінійно-квадратичними функціями.

Поглинену у ЩЗ дозу за будь-якої вхідної активності та для будь-якої доби легко розрахувати, підставивши в (1) розраховані значення  $a$  та  $b$ .

За описаним вище алгоритмом написано програму для проведення розрахунків поглинених доз в органах шурів за одноразового надходження  $^{131}\text{I}$  до вільної активності. Програму створено у середовищі MATLAB та адаптовано для використання на будь-якому ПК під управлінням ОС Windows (версії, не старішої за XP). Програма має простий та зрозумілий графічний інтерфейс користувача та вимагає в якості вхідних даних лише значення активності, що вводиться, у Бк, терміну проведення експерименту й часу, станом на який визначаються розрахункові параметри. Середня відносна похибка розрахунків дози становить  $\pm 2\%$  і не перевищує  $\pm 10\%$ .

1. Дрозд І.П. та ін. // Ядерна фізика та енергетика. - 2012. - Т. 13, № 3. - С. 283 - 288.
2. Дрозд І.П., О.А. Сова, А.І. Липська // Ядерна фізика та енергетика. - 2015. - Т. 16, № 2. - С. 157 - 163.

# ОСОБЛИВОСТІ НАКОПИЧЕННЯ $^{131}\text{I}$ ТА ДОЗООУТВОРЕННЯ У НЕВАГІТНИХ І ВАГІТНИХ САМОК ЩУРІВ

І. П. Дрозд, А. І. Липська, О. А. Сова

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

З метою визначення параметрів накопичення та виведення  $^{131}\text{I}$  та дослідження особливостей дозоутворення у невагітних та вагітних самок щурів, порівняно з самцями, а також виявлення біологічних ефектів було проведено спеціальний експеримент у дві стадії. На першій стадії 13 самкам, масою  $210 \pm 15$  г і 14 самцям, масою  $376 \pm 32$  г безпородних щурів ввели одноразово перорально водний розчин  $\text{Na}^{131}\text{I}$  по 27,35 кБк на тварину. Тварин умертвляли згідно із графіком експерименту з дотриманням вимог ст. 26 Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження». На другій стадії 25 вагітним самкам лінії Вістар масою  $210 \pm 15$  г одноразово перорально ввели по 27,35 кБк на тварину водного розчину  $\text{Na}^{131}\text{I}$ . Шість тварин було забито згідно із графіком для визначення параметрів виведення ізотопу.

Вміст ізотопу в органах і тканинах визначали  $\gamma$ -спектрометричним методом з застосуванням напівпровідникового детектора. Статистичну обробку результатів виконували, використовуючи програмний пакет STATISTICA.

## Характеристики виведення $^{131}\text{I}$ з організму щурів за одноразового надходження

| Характеристика                         | Невагітні самки                          | Вагітні самки                          | Самці                                   |
|--|--|--|---|
| Коефіцієнт переходу ШКТ→ЩЗ             | 0,54                                     | 0,25                                   | 0,44                                    |
| Функція зміни активності у ЩЗ          | $Q(t) = 19741 \cdot e^{-0,2756 \cdot t}$ | $Q(t) = 7379 \cdot e^{-0,138 \cdot t}$ | $Q(t) = 14678 \cdot e^{-0,204 \cdot t}$ |
| Ефективний період напіввиведення, доби | 2,19                                     | 5,02                                   | 3,40                                    |

Аналізуючи отримані дані (табл.), виявили, що параметри метаболізму  $^{131}\text{I}$  у самців і самок, а також вагітних і невагітних самок значно відрізняються. Так, коефіцієнти переходу з ШКТ до ЩЗ у невагітних самок ( $k_{th}$ ) суттєво більші, ніж у самців, а у вагітних самок – значно менші. Ефективні періоди напіввиведення ізотопу із ЩЗ ( $T_{ef}$ ) навпаки – у невагітних самок значно менші, ніж у самців, а у вагітних самок – більші. Очевидно, затримку йоду в ор-

ганізмі вагітних самок можна пояснити його необхідністю для розвитку плоду. Порівнявши  $k_{th}$  і  $T_{ef}$  у самців, задіяних у даному досліді (маса  $376 \pm 32$  г) з такими у самців, масою  $215 \pm 15$  г (отримані у експерименті, який проводили раніше), виявили, що вони у межах похибки збігаються.

Для зручності визначення поглинутої у ЩЗ дози для будь-якого терміну після введення ізотопу було побудовано номограми. Виявилось, що дози у ЩЗ самців приблизно на 25 % менші, ніж у невагітних самок. Це пов'язано, перш за все, з тим, що маса ЩЗ у старих тварин є значно більшою, ніж у молодих.

Потужність дози в ЩЗ невагітних самок до 15 доби є достовірно вищою, ніж у самців, що може впливати на біологічні ефекти.

## **ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТИЧНОСТІ МІШЕНЕЙ СЕРЕД ГЕНІВ ЦВІТІННЯ ДО РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ У РОСЛИН**

**М. В. Кривохижа, Н. М. Рашидов**

*Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України,  
відділ біофізики та радіобіології,  
лабораторія біофізики сигнальних систем, Київ*

Цвітіння рослин є критичною та чутливою фазою до дії стрес-факторів в онтогенезі рослин, формуванні їх врожайності, подальшій передачі генетичного матеріалу наступним поколінням.

Перехід від вегетативної до генеративної фаз ініціюється відповідно генетичних регуляторних комплексів на екологічні та ендogenous фактори, такі як довжина світлового дня, вік та гормональний статус рослини, температура (O'Maoileidigh et al., 2014). Відповідно, існують різні шляхи детермінації рослин по репродуктивному типу розвитку, які запускають каскади генів цвітіння, а саме фотоперіодичний, який регулюється циркадними генами, яровізаційний, гібериліновий та автономний. Нараховують близько 80 генів, які мають відношення до цвітіння, але серед них можна виділити ряд генів, які грають ключову роль (Pastore, 2011). До таких належать гени активації часу цвітіння, детермінації флоральної меристеми та формування квіткових органів, що включають в себе транскрипційні фактори MADS-box (Parenicova et al., 2003).

Для дослідження впливу опромінення на гени цвітіння, як основний модельний об'єкт використовується *Arabidopsis thaliana* (L.) Heunh родини *Brassicaceae*. Головними перевагами цієї рослини є досить невеликий розмір геному  $\sim 135$  Мбп, структурований в 4 хромосоми та 5-ту гаплоїдну хромосому та високий рівень вивченості функцій генів та їх регуляторних систем (TAIR).

За результатами біоінформатичного аналізу консервативності генів цвітіння, який виконали за допомогою онлайн-ресурсу NCBI BLAST, ми теоретично визначили коло генів, які можуть бути мішенями при опроміненні рослин.

З цією метою припускаємо, що гени, які виявляють високий рівень консервативності, мають функціональну важливість в цвітінні. Відповідно, такі гени можуть високу функціональну чутливість до мутаційних та епігенетичних змін, які відбуваються при радіаційному опроміненні, та зміни в експресії цих генів може приводити до змін у репродуктивному розвитку рослин. Зниження активності ключових генів цвітіння може приводити до затримки часу цвітіння та детермінації флоральної меристеми, некоректного утворення квіткових органів. Ці явища можуть негативним чином впливають на формування насіння та його наповненість, і, відповідно, знижувати врожайність рослин, у яких вона пов'язана з насінням. Для *A. thaliana*, такими генами є *Flowering locus T* (FT) – основний фактор сигналіngu апікальної меристеми про розвиток по квітковому типу; циркадний білок – *Suppressor of overexpression of CO 1* (SOC1), ген детермінації флоральної меристеми *LEAFY* (LFY) та транскрипційні фактори MADS-комплексу та гени ABCDE-моделі утворення квіткових органів *APETALA1* (AP1), *AGAMOUS* (AG), *CAULIFLOWER* (CAL) *SEPALLATA1-4* (*SEP 1-4*) *PISTILLATA* (PI) (Gramzow, Theissen, 2010; O'Maileidigh et al., 2014). Детальне дослідження даних генів допоможе всебічно охарактеризувати процес цвітіння рослин під впливом радіаційного опромінення.

1. Gramzow L, Theissen G. // Genome Biology. - 2010 - Vol. 11. - P. 214.
2. O'Maileidigh D.S., Graciet E., Wellmer F. // New Phytologist. - 2014 - Vol. 201. - P. 16 - 30.
3. Parenicova, L. et al. // Plant Cell. - 2003. - Vol. 15. - P. 1538 - 1551.
4. Pastore J.J. // Publicly Accessible Penn Dissertations. - 2011 - 158 p.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АСТАКСАНТИНА НА РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНУ ХРОМОСОМНУ НЕСТАБІЛЬНІСТЬ У СОМАТИЧНИХ КЛІТИНАХ ЛЮДИНИ *IN VITRO*

Д. А. Курінний<sup>1</sup>, С. Р. Рушковський<sup>2</sup>, О. Б. Дибська<sup>1</sup>, М. А. Пілінська<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України, Київ

<sup>2</sup> Навчально-науковий центр «Інститут біології»,

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

Астаксантин – каротиноїд, який відноситься до групи ксантофілів. Низька токсичність та висока антиоксидантна активність дають змогу припустити наявність у нього генопротекторних властивостей.

Метою досліджень було встановлення можливості модифікації астаксантином радіаційно-індукованих цитогенетичних порушень в лімфоцитах периферичної крові людини.

Роботу проведено з використанням стандартного методу дослідження хромосом соматичних клітин людини - культивування лімфоцитів перифе-

ричної крові 5-ти умовно здорових волонтерів, які заперечували свідомий контакт з мутагенами (дві жінки, троє чоловіків, середній вік 41 рік), цитогенетичний аналіз рівномірно забарвлених препаратів метафазних хромосом. Астаксантин в оптимальній робочій концентрації 20,0 mg/ml, визначеної за результатами попередніх власних досліджень, додавали в культуру лімфоцитів до початку інкубації, перед опроміненням. Опромінення культури проводили випромінювачем IBL-237C (потужність 2,34 Гр/хв) в дозі 1 Гр.

Встановили, що фонова середньогрупова частота аберантних метафаз в лімфоцитах периферичної крові становить  $(2,52 \pm 0,34)$  % з міжіндивідуальними коливаннями від 1,67 до 3,02 %. Пошкодження хромосом були представлені переважно одиночними та парними ацентричними фрагментами  $(1,60 \pm 0,28$  та  $0,97 \pm 0,22$  на 100 метафаз відповідно).

При дії астаксантину *in vitro* на неопромінені лімфоцити середньогруповий цитогенетичний ефект за частотою аберантних клітин  $(2,36 \pm 0,38)$  % і рівнями та спектром аберацій хромосом не відрізнявся від аналогічних фонових показників ( $P > 0,05$ ), які відповідали значенням спонтанного хромосомного мутагенезу в соматичних клітинах людини.

В експериментах з опроміненням виявили зростання середньогрупової частоти аберантних метафаз до  $22,53 \pm 1,67\%$  та аберацій хромосом до  $24,47 \pm 1,73$  на 100 метафаз з розкидом індивідуальних коливань в межах 18,42 - 25,67 та 21,05 - 27,81 відповідно. Значно розширився спектр радіоіндукованих хромосомних порушень. Серед пошкоджень переважали прості та обмінні аберації хромосомного типу – вільні парні фрагменти та ацентричні кільця (із сумарною частотою  $7,29 \pm 1,05$  на 100 метафаз); дицентрики, центричні кільця та аномальні моноцентрики  $(12,80 \pm 1,35; 2,75 \pm 0,66; 0,49 \pm 0,28$  на 100 метафаз відповідно). Дія астаксантину *in vitro* на опромінені лімфоцити призвела до статистично значущого ( $P < 0,001$ ) зменшення частоти аберантних клітин (до  $8,04 \pm 0,88$  %) та аберацій хромосом (до  $8,40 \pm 0,90$  на 100 метафаз) за рахунок вірогідного зниження рівня класичних нестабільних цитогенетичних маркерів радіаційного впливу: дицентричних та кільцевих хромосом (до  $1,90 \pm 0,44$  та  $0,42 \pm 0,21$  на 100 метафаз відповідно), а також сумарної частоти парних фрагментів і ацентричних кілець (до  $5,28 \pm 0,82$  на 100 метафаз). Рівень одиночних фрагментів  $(0,85 \pm 0,30$  на 100 метафаз) практично не змінився і не відрізнявся від фонових значень.

Таким чином, отримані результати вказують на потужний антимуtagenний та радіопротекторний потенціал астаксантину у досліджуваній концентрації.

## МОДИФІКАЦІЯ НАКОПИЧЕННЯ КАДМІЮ ПРОРОСТКАМИ КУКУРУДЗИ В УМОВАХ ВОДНОЇ КУЛЬТУРИ ШЛЯХОМ ГОСТРОГО ГАММА-ОПРОМІНЕННЯ НАСІННЯ

Ю. О. Кутлахмедов<sup>1</sup>, В. В. Швартау<sup>2</sup>, Л. М. Михальська<sup>2</sup>,  
А. Г. Салівон<sup>1</sup>, С. А. Пчеловська<sup>1</sup>, Л. В. Тонкаль<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України, Київ,

<sup>2</sup> Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, Київ

Зважаючи на масштабне забруднення радіонуклідами внаслідок аварії на ЧАЕС і постійно зростаюче техногенне навантаження на довкілля, детально-го вивчення потребують особливості комбінованого впливу іонізуючого випромінювання та важких металів й пестицидів на живі організми. Токсична дія антропогенних чинників може бути модифікована за рахунок одночасного або послідовного впливу кількох стресорів тієї самої або ж іншої природи. Наслідки комбінованих впливів можуть бути більш небезпечними та шкідливими, ніж можна очікувати від простого додавання ефектів (синергізм), але може спостерігатись і протилежне явище – коли дія одного стресового чинника підвищує захисні реакції організму, внаслідок чого сумарний ефект при дії двох різних стресорів є меншим, ніж при дії одного з них (антагонізм).

Важкі метали, зокрема кадмій, мають значну фітотоксичність і спричиняють суттєві порушення рослинного метаболізму вже у низьких концентраціях. У досліджах вивчали вплив попереднього гострого гамма-опромінення насіння кукурудзи в дозах 35, 70 та 105 Гр на поглинальні та ростові характеристики проростків кукурудзи в умовах водної культури. В якості характеристик стану досліджуваного біологічного об'єкту (проростків кукурудзи) використовували раніше нами запропоновану характеристику поглинальної здатності рослин – фактор радіємності ( $F_6$ ), та відносну швидкість росту головного кореня проростків. Крім того, використовуючи фактор радіємності, було проведено кількісну оцінку характеру взаємодії двох факторів – коефіцієнта синергізму. Вплив токсичного фактора реалізували шляхом внесення розчину  $CdCl_2$  в поживне середовище в концентраціях 10, 20, 40 мкМ. Методом ICP-MS на Agilent 7700x було визначено відсоток поглинання іонів кадмію проростками, вирощеними з неопроміненого насіння та опроміненого в дозі 35 Гр для різних концентрацій внесеного розчину  $CdCl_2$ . Результати елементного аналізу свідчать про незначну відмінність у поглинанні іонів кадмію проростками, вирощеними з опроміненого та неопроміненого насіння за внесених концентрацій 10 мкМ і 40 мкМ. Для концентрації 20 мкМ спостерігалось зменшення поглинання у процентному відношенні (на 3%) для проростків, вирощених із опроміненого насіння. Виявлено, що спостерігається тенденція до зменшення відсотку поглинання від внесеної кількості при збільшенні концентрації хлориду кадмію – з 21 % при внесенні 10 мкМ до 8 % при внесенні 40 мкМ.

Таким чином, гостре гамма-опромінення насіння кукурудзи в дозі 35, 70 та 105 Гр активує ростові процеси рослин кукурудзи в умовах водної культури, а також впливає на поглинальні характеристики стосовно спеціально внесеного в середовище радіонукліда-трассеру -  $^{137}\text{Cs}$ . Проведена кількісна оцінка характеру взаємодії радіаційного та токсичного факторів впливу за коефіцієнтом синергізму. Виявлено, що взаємодія цих факторів має неадитивний і транзитивний характер. Крім того, визначено антагоністичну дію радіаційного чинника – опромінення насіння кукурудзи сприяло зменшенню негативно-го впливу важкого металу – хлориду кадмію як на ростові так і на поглинальні показники проростків кукурудзи.

Аналітичні дослідження на ICP-MS Agilent 7700x виконано за сприяння проекту INSC Program 2011: Health and Ecological Programs around the Chernobyl Exclusion Zone.

## **ОСОБЛИВОСТІ КОМБІНОВАНОГО ВПЛИВУ НЕЙТРОНІВ СПЕКТРУ ПОДІЛУ ТА СВІТЛА ЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ НА КЛІТИНИ *IN VITRO***

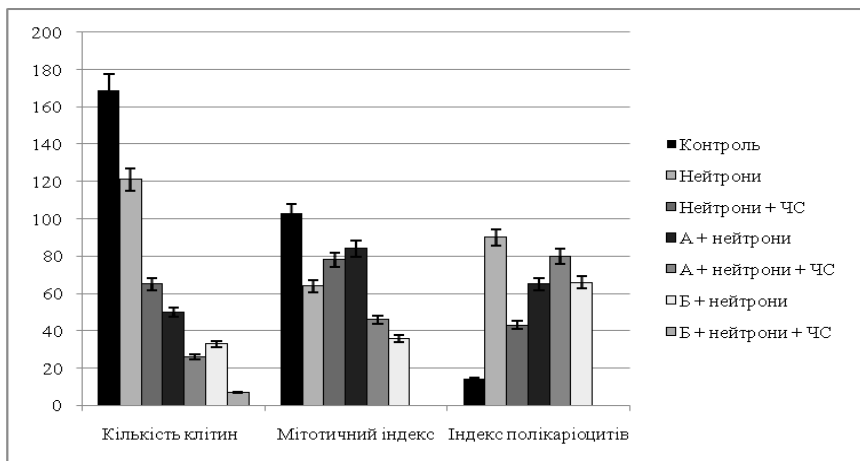
**Г. Й. Лавренчук<sup>1</sup>, Ю. Б. Шевченко<sup>2</sup>, Л. Є. Червонна<sup>2</sup>, І. В. Козловська<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини  
НАМН України», Київ

<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Нейтронзахватна терапія (НЗТ) є перспективним методом лікування пухлин, які погано піддаються лікуванню традиційними методами. Принцип дії заключається в наступному: при зіткнення теплових потоків нейтронів з атомами препаратів, що володіють великим перерізом їх захоплення (бор-10, гадоліній-157) та вибірково накопичуються в пухлинних клітинах, відбувається ядерна реакція і вивільнення великої кількості енергії. Водночас одним із нових підходів для підвищення ефективності НЗТ та зменшення променевого навантаження на нормальні клітини є поєднання її із фотодинамічною терапією (ФДТ), в результаті якої утворюються цитотоксичні агенти (синглетний кисень і вільні радикали), що вражають клітинні елементи пухлинної тканини. Останніми роками в кількох лабораторіях світу синтезовано сполуки, які об'єднують властивості нейтронозахватних агентів (НЗА) для НЗТ і фотосенсибілізаторів для ФДТ.

Проведено комплексне експериментальне дослідження комбінованого впливу іонізуючого випромінювання (нейтронів спектру поділу і гамма-квантів  $^{60}\text{Co}$ ), світла червоного діапазону (630 нм) та НЗА з молекулярною і наноструктурою, що містили бор чи гадоліній на морфологічні характеристики клітин *in vitro* у тест-системі культури проліферуючих клітин лінії L929, що дало змогу встановити характер та особливості дії.



Показники життєздатності клітин лінії L<sub>929</sub> на 5-ту добу культивування після опромінення нейтронами спектру поділу в дозі 1 Гр та у поєднанні з червоним світлом і НЗА з фотосенсибілізуючими властивостями (реагенти А і Б) в концентрації 5 мкг/мл. Пояснення до рисунка: ЧС – червоне світло, А – реагент А, Б – реагент Б. На осі ординат – кількість клітин на площі препарату 0,05 мм<sup>2</sup>, мітотичний індекс та індекс полікаріоцитів у %.

Було встановлено, що за комбінованого впливу нейтронів спектру поділу в дозі 1 Гр, червоного світла та НЗА у концентрації 5 мкг/мл спостерігали загибель 83 % - 93 % клітин, кількість апоптотичних клітин в дослідних культурах збільшувалась в 5 - 6 разів у порівнянні з контролем. Мітотична активність в культурі клітин за цих умов інгібувалась у 2 - 2,5 раза, водночас кількість атипичних багатоядерних клітин зростала майже у 5 разів. Виявлено, що за нейтронного опромінення в культурі клітин утворювались полікаріоцити з великою кількістю ядер (6 - 8) та мікроядер, що вказувало на механізм пошкодження ДНК клітин переважно шляхом двониткових розривів та гальмування процесів їх репарації. Встановлено, що вклад  $\gamma$ -компоненти, яка супроводжує нейтронне опромінення, може впливати на показники життєздатності нормальних клітин за умови перевищення дози  $\gamma$ -квантів більше 0,5 Гр.  $\gamma$ -опромінення клітин в середньо- та сублетальних дозах у поєднанні з нейтронозахватними агентами з молекулярною та наноструктурою та світла червоного діапазону призводило до ураження та загибелі до 80 % клітин, в основному, за рахунок апоптозу.

1. *Наврззов С.Н., Кахоров Ж.Н., Ходжаева Н.Х.* Экспериментальное обоснование нейтрон-захватной терапии на горизонтальном канале исследовательского атомного реактора ВВР-СМ Института ядерной физики Республики Узбекистан // *Арх. клин. эксп. мед.* - 2014. - Т. 23, № 1. - С. 20 - 22.



## ОСОБЛИВОСТІ ЗМІН КРОВОТВОРНОЇ СИСТЕМИ ЩУРІВ ЗА ОДНОРАЗОВОГО ВВЕДЕННЯ $^{131}\text{I}$

А. І. Липська<sup>1</sup>, Н. М. Рябченко<sup>1</sup>, О. Б. Ганжа<sup>1</sup>,  
О. А. Сова<sup>1</sup>, І. П. Дрозд<sup>1</sup>, Є. М. Прохорова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

<sup>2</sup> ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини  
НАМН України», Київ

Досліджено реакцію кровотворної системи експериментальних тварин за кількісними та якісними показниками периферичної крові і кісткового мозку (КМ) на  $^{131}\text{I}$  в режимі одноразового введення.

Робота виконана на безпородних щурах-самцях. Розчин  $\text{Na}^{131}\text{I}$  вводили з активністю 27,35 кБк/тварину. Рівень генотоксичних ушкоджень, індукованих  $^{131}\text{I}$  в КМ щурів, визначали за цитогенетичними маркерами, а саме – частотою мікроядер (МЯ) в поліхроматофільних еритроцитах (ПХЕ). Цитотоксичні ефекти та порушення проліферації клітин еритроїдного ряду оцінювали за співвідношенням незрілих ПХЕ до зрілих форм нормохроматофільних еритроцитів (НХЕ) в КМ (індекс цитотоксичності). Рівень апоптозу визначали за вмістом ДНК в каріоцитах КМ із визначенням фракції гіподиплоїдних клітин. Клітини аналізували на проточному цитофлуориметрі Beckman Coulter EPICS XL (ЦККП НАН України). Аналізували зміни вмісту лейкоцитів і еритроцитів у периферичній крові щурів, кількість клітин КМ та тимусу.

Найвищий рівень МЯ в клітинах еритроїдного ряду (у 3 рази вищий від контролю) спостерігали на 1-шу добу після введення  $^{131}\text{I}$ , після чого він поступово знижувався і лише на 30-ту добу дослідів вірогідно не відрізнявся від контрольних значень ( $5,5 \pm 1,3$  на 1000 ПХЕ та  $4,0 \pm 0,6$  відповідно). Водночас, дозалежності рівня генотоксичних ушкоджень в клітинах КМ не виявлено.

В усі терміни дослідів не спостерігали підвищення рівня апоптичних клітин в КМ, що свідчить про відсутність активації додаткових компенсаторно-захисних процесів, спрямованих на елімінацію ушкоджених клітин за даної активності радіоізотопу. Також не виявлено змін проліферативної активності клітин еритроїдного ряду КМ, тобто в умовах експерименту  $^{131}\text{I}$  не індукував цитотоксичних ефектів.

Виявлено значні зміни вмісту лейкоцитів у різні терміни спостереження по відношенню до вихідних даних. Лейкоцитоз проявлявся чергуванням фаз стимуляції та пригнічення, але і на останній термін (30-та доба) відновлення вмісту лейкоцитів не відбувалось. Вміст еритроцитів вірогідно не змінювався впродовж експерименту.

Кількість клітин КМ була знижена відносно контролю в усі терміни спостереження з мінімальним значенням на 1-шу добу. Також встановлено вірогідне зниження клітинності тимуса в усі терміни спостереження.

Таким чином, специфічний характер змін у кровотворній системі тварин

за одноразового введення  $^{131}\text{I}$  проявлявся у коливанні основних показників із чергуванням фаз стимуляції/пригнічення, розвитку раннього стійкого лейкоцитозу та формуванні цитогенетичних ушкоджень в клітинах кісткового мозку щурів в усі терміни досліду, зменшення яких не залежало від поглиненої дози.

## **ОЦІНКА СТАНУ КРОВОТВОРНОЇ СИСТЕМИ МИШОПОДІБНИХ ГРИЗУНІВ З ПРИРОДНИХ БІОТОПІВ БЛИЖНЬОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ЧАЕС**

**А. І. Липська, Н. М. Рябченко, О. О. Бурдо, О. А. Сова, О. Б. Ганжа**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Радіонуклідне забруднення природного середовища в результаті аварії на Чорнобильській АЕС призвело до істотного збільшення радіаційного фону, накопичення радіонуклідів біотою і, відповідно, дозових навантажень на організми, в першу чергу, в межах Чорнобильської зони відчуження (ЗВ ЧАЕС). З перших днів після аварії і до сьогодні однією з головних була і залишається проблема оцінки порушень у біосистемах унаслідок інтенсивного радіонуклідного забруднення, яке у зоні відчуження набуло хронічного характеру. Мишоподібні гризуни широко використовуються в радіобіологічних та радіоекологічних дослідженнях у якості об'єктів для біоіндикації екотоксичності.

Метою роботи - оцінка стану кровотворної системи мишоподібних гризунів за комплексом кількісних та структурних показників кісткового мозку та периферичної крові

Об'єктом досліджень були однорідні по репродуктивному статусу *Clethrionomus sp.*, відловлені в ближній зоні ЧАЕС у вересні 2015 р. Моніторинговий полігон знаходиться на відстані ~ 3 км від аварійного енергоблоку ЧАЕС (територія «Рудого лісу»). Радіоекологічний моніторинг території дослідного полігону виявив територіальну нерівномірність забруднення радіоактивними викидами. Потужність експозиційної дози  $\gamma$ - випромінювання перевищувала контрольні рівні в 30-150 разів. Вміст радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у різних особин змінювався в широких межах.

Дослідження стану кровотворної системи у мишоподібних гризунів з ближньої ЗВ ЧАЕС виявило кількісні та якісні зміни в системі кровотворення: структурні порушення в кровотворних клітинах та процесах їх диференціювання. Встановлено достовірне зменшення кількості еритроцитів, клітин кісткового мозку (КМ) на фоні істотного зростання клітинності тимусу, порушення лейко-еритроцитарного співвідношення у тварин із забруднених територій у порівнянні з контрольною групою. Це вказує на суттєве пригнічення гемопоезу, в більшій мірі еритропоезу. В лейкоцитарній формулі виявлено зниження числа нейтрофілів, лімфоцитоз і моноцитопенію, підвищену

кількість лімфоцитів із структурними порушеннями ядра та вакуолізацією цитоплазми.

Встановлено достовірне підвищення рівня мікроядер в поліхроматофільних еритроцитах КМ та значні порушення процесів поділу та диференціювання клітин еритроїдного ряду (індекс цитотоксичності) у імпактних тварин. Також спостерігали підвищення рівня апоптичних клітин в КМ, що свідчить про активацію додаткових компенсаторно-захисних процесів, спрямованих на елімінацію ушкоджених клітин.

Кількісно-структурні зміни в крові та кровотворних органах у тварин, що постійно знаходяться в умовах хронічної дії сукупних радіаційних чинників ЗВ ЧАЕС є наслідком хронічного комбінованого опромінення природних популяцій тварин.

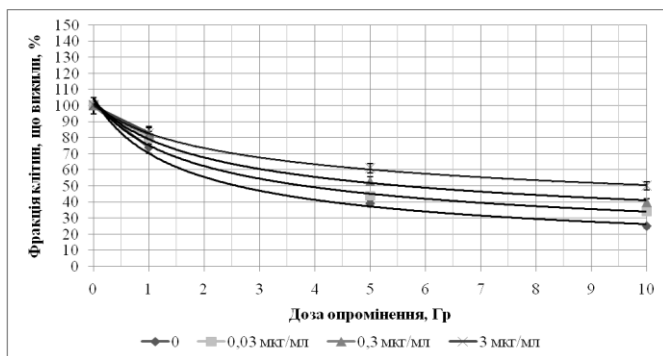
## **РАДИОПРОТЕКТОРНІ ВЛАСТИВОСТІ 2-МЕРКАПТОБЕНЗТІАЗОЛУ У ТЕСТ-СИСТЕМІ ПЕРЕЩЕПЛЮВАНИХ ПРОЛІФЕРУЮЧИХ КЛІТИН**

**Х. М. Литвинчук, Г. Й. Лавренчук, О. А. Бойко**

*ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України», Київ*

Експериментальні дослідження радіомодифікуючого ефекту 2-меркаптобензтіазолу показали, що в ана-телофазному тесті в клітинах кореневої меристеми проростків насіння *Allium cepa L.* він не проявляв мутагенних, мітозмодифікуючих чи токсичних ефектів у фізіологічних для цих клітин концентраціях. Надмірна кількість реагента призводила до зменшення мітотичної активності клітин меристеми, що може вказувати на можливий механізм протекторної дії.

Було встановлено, що 2-меркаптобензтіазол у фізіологічних для клітин концентраціях (3,00 - 0,003 мкг/мл) не змінює щільності клітинної популяції в моношарових культурах клітин, але підвищує мітотичну активність у термінальний період культивування (5 - 6 доби). Збільшення кількості апоптичних клітин у цей період пояснює сталу кількість клітин в культурі. Після опромінення клітин в дозах 1, 5 і 10 Гр спостерігали дозозалежне зменшення їх проліферативної та мітотичної активності та істотне зростання в культурі клітин (у 4 рази) кількості полікаріоцитів, яких вважають маркерами репродуктивної загибелі. Збільшення рівня апоптозу в опроміненіх культурах проліферуючих клітин свідчить про радіогенний характер їх загибелі. Показано, що за умови інкубації клітин до та під час опромінення з 2-меркаптобензтіазолом зменшувались радіоіндуковані ушкодження клітин: підвищувались проліферація та мітотична активність порівняно з дією тільки радіації. Зменшення кількості полікаріоцитів у культурі клітин вказувало на генопротекторні властивості реагента. Водночас підвищений рівень апоптозу за цих умов свідчив про елімінацію ушкоджених радіацією клітин з культури.



Залежність кількості клітин, що вижили, за умов інкубації з 2-меркаптобензотріазолом в області концентрацій 0,03 - 3,00 мкг/мл та опромінення гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$  у дозах 1, 5 і 10 Гр.

Кількісна оцінка радіопротекторних властивостей 2-меркаптобензотріазолу у тест-системі культури клітин лінії  $L_{929}$  показала, що найвищі показники коефіцієнта захисту (0,31 - 0,36) реагент показав при концентрації 3 мкг/мл при опроміненні в дозі 1 Гр. Водночас фактор зменшення дози, розрахований за  $\text{LD}_{50}$ , при концентраціях 2-МБТ 0,03 та 0,30 мкг/мл мав значення 1,5 та 1,8 відповідно, а за концентрації 3,00 мкг/мл ФЗД був максимальний – 4.

За сукупністю даних літератури та результатів власних досліджень можна вважати 2-меркаптобензотріазол реагентом з радіопротекторними властивостями для клітин *in vitro*.

1. Васин М.В. Классификация противолучевых средств как отражение современного состояния и перспективы развития радиационной фармакологии. Острые проблемы разработки противолучевых средств: консерватизм или модернизация : материалы Российской конференции, Москва, 2012 // Радиационная биология. Радиоэкология. - 2013. - Т. 53, № 6. - С. 459 - 468.

## ЗВ'ЯЗОК ТРАНСКРИПЦІЙНОЇ АКТИВНОСТІ ГЕНІВ ПІДТРИМКИ ЦІЛІСНОСТІ ГЕНОМУ З МОРФО-ФЕНОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОПРОМІНЕНИХ РОСЛИН *A. THALIANA* L.

**С. В. Літвінов, Н. М. Рашидов**

*Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України, Київ*

Вивчення паттернів транскрипції трьох ключових генів систем підтримання цілісності геному модельної квіткової рослини *A. thaliana* в умовах гострого і фракціонованого рентгенівського опромінення показало нелінійну залежність рівня експресії даних генів від дози. Дозовий інтервал становив 3 - 21 Гр при потужності дози опромінення 89 сГр/хв. Ми використовували метод RT-PCR з локус-специфічними праймерами на матриці тотальної РНК, виділеної з розеткових листків через 2 год після опромінення. Відносний рі-

вень транскрипційної активності генів оцінювали за допомогою гелденситометрії в програмному пакеті ImageJ [1]. В якості референсного локусу був обраний ген «домашнього господарства» *AtEfla*. Встановлено, що в тканинах розеткових листків 4-тижневих рослин ген *AtRad1* експресується конститутивно, *AtRAD51* індукційно, а *AtKu70* є геном із змішаною конститутивно-індукованою експресією. За відсутності фактора опромінення відновлення цілісності ДНК здійснюється переважно системами негомологічного поєднання кінців двониткових розривів, репарації одониткових розривів та ексцизійної репарації нуклеотидів. Опромінення рослин в дозах 9–21 Гр змінює відносну активність досліджуваних генів в напрямку підвищення еспресії *AtKu70* і *AtRad1*, які є маркерами швидкої, проте неточної репарації двониткових розривів ДНК. При опроміненні рослин в дозі 12 Гр нами відмічена транскрипційна репресія локусів *AtKu70* та *AtRAD51*. Аналіз дозових залежностей для таких морфологічних та фенологічних ознак як довжина і швидкість росту стебла; кількість листків в прикореневій розетці; час початку цвітіння; кількість квіток та стручків на рослині; середня тривалість вегетації; частка рослин, розвиток яких тимчасово зупиняється на стадії розетки або брунькування («growth arrest») засвідчує наявність стійких і повторюваних кореляційних зв'язків даних ознак з варіацією транскрипційної активності генів підтримки цілісності геному *AtKu70*, *AtRAD51*, *AtRad1*. Статистично достовірні коефіцієнти кореляції Спірмена становлять 0,7-0,9 у випадку гострого опромінення і 0,6-0,7 у випадку фракціонування дози на три рівних фракції з інтервалом у 24 год. Більша частина ознак корелює з сумарним рівнем транскрипції трьох досліджуваних генів, однак кількість квіток на рослині і час початку цвітіння найбільш тісно пов'язані з експресією маркера гомологічної рекомбінації *AtRAD51*. Для кількості зрілих стручків подібної залежності не спостерігається. Частка рослин, які знаходяться в стані «growth arrest», тісно корелює з активністю локусу *AtRad1*, що відповідає даним інших авторів, згідно з якими «growth arrest» є Rad1-залежною реакцією на іонізуюче опромінення [2]. Отримані результати дають можливість стверджувати, що важливу роль в онтогенетичній відповіді рослини на іонізуюче опромінення відіграє система репарації ДНК, зокрема регуляція/дерегуляція генів підтримання цілісності геному. Як стимуляція, так і інгібування формування, росту та розвитку органів рослини під впливом радіації в діапазоні доз, значно менших за LD<sub>50</sub>, зумовлені активацією або репресією транскрипційної активності локусів *Ku70*, *RAD51*, *Rad1*. Таким чином, виявлені нами радіобіологічні ефекти малих доз іонізуючого опромінення [3] можуть бути пов'язані з радіогенною модифікацією активності систем підтримки цілісності геному меристематичних клітин, а не з прямим генотоксичним впливом радіації.

1. Bradford W. // Cell Biology Education. - 2005. - Vol. 4. - P. 157 - 168.
2. Preuss S., Britt A. // Genetics. - 2003. - Vol. 164. - P. 323 - 334.
3. Лимвінов С. // Ядерна фізика та енергетика. - 2014. - Т. 15, № 4. - С. 406 - 414.

# ВПЛИВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ОКСИДІВ АЗОТУ НА ОКИСНИЙ МЕТАБОЛІЗМ ТКАНИН ОРГАНІЗМУ З КАРЦИНОМОЮ ЛЕГЕНІ ЛЬЮЇС

**Л. І. Маковецька, М. О. Дружина, О. А. Главін, В. М. Михайленко**

*Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології  
ім. Р.Є. Кавецького НАН України, Київ*

У роботі досліджували вплив іонізуючого випромінювання (ІВ) та оксидів азоту (ОА) на ключові показники вільнорадикального окиснення в організмі мишей з карциномою легені Льюїс (КЛЛ). В динаміці експерименту на 0, 7, 15 та 23 доби після перещеплення КЛЛ визначали інтенсивність генерації  $O_2^{\cdot-}$  перитонеальними макрофагами, гепатоцитами та клітинами кісткового мозку (ККМ), вміст продуктів пероксидного окиснення ліпідів (малонового діальдегіду – МДА) в плазмі крові та тканині легень, прооксидантно-антиоксидантне співвідношення у крові. Експоненційний ріст КЛЛ супроводжувався посиленням генерації супероксидних аніон-радикалів перитонеальними макрофагами, гепатоцитами та ККМ мишей. ІВ пригнічували напрацювання супероксидного аніон-радикала у цих клітинах. Термінальний період (утворення метастазів) характеризувався зниженням (у 1,6 - 2 рази порівняно із групою КЛЛ) фагоцитуючої здатності макрофагів за дії досліджуваних модуляторів, що може свідчити про виснаження імунної здатності організму протидіяти розвитку пухлинного процесу. Домінуючим чинником, що впливав на окисний метаболізм ККМ та гепатоцитів були продукти метаболізму/розпаду КЛЛ. Досліджувані чинники, а особливо їх сумісна довготривала дія, значно посилювали цей ефект. У клітинах печінки на 23 добу експерименту за довготривалої дії ОА генерація  $O_2^{\cdot-}$  збільшувалась на 62 % порівняно з групою тварин із КЛЛ, тоді як за короткотривалої дії – на 25 %.

Досліджувані чинники виступали як модифікуючі фактори, що гальмували напрацювання МДА у крові мишей з КЛЛ. Це може бути зумовлено як зміною шляхів перетворення продуктів метаболізму КЛЛ за участі вільних радикалів, що генерувались у крові модифікуючими чинниками, так і пришвидшенню розкладу МДА цими активними продуктами. Проте на 23 добу за довготривалої дії ОА та у сумісництві з ІВ відмічали підвищення рівня МДА у крові. Слід відмітити, що довготривала дія ОА призводила до суттєвіших пошкоджень, ніж короткотривала (рівень пероксидних процесів на 23 добу був на 35 % вищий). У тканині легень збільшення рівня МДА, особливо за довготривалої дії чинників відмічали на 15 та 23 добу спостереження, що співвідноситься із появою метастазів у легенях та із збільшенням їх кількості у мишей даних груп на термінальній стадії росту пухлини. Таку закономірність спостерігали як за короткотривалого так і довготривалого впливу ОА на

мишей із КЛЛ. Різницю відмічали лише за сумісної дії факторів, коли короткотривала дія призводила до зниження вмісту МДА (його наближення до вихідних даних), як і за впливу ІВ. Дія ОА та ОА + ІВ на тварин з КЛЛ призводили до зрушення про- антиоксидантного співвідношення у бік інтенсифікації вільнорадикальних процесів. Максимум фіксували на 7 добу, на початку експоненційного росту пухлини, що свідчить про додаткове негативне навантаження на організм зазначених чинників.

Таким чином, порушення окисного метаболізму та формування оксидативного стресу за сумісної дії екзогенних ІВ та ОА переважним чином залежить від тривалості дії ОА і супроводжується збільшенням генерації супероксидного аніон-радикала перитонеальними макрофагами, ККМ та гепатоцитами, накопиченням продуктів пероксидного окиснення ліпідів у крові та тканини легень та зрушенням про- антиоксидантного співвідношення у бік прооксидантних процесів.

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ШЛЯХІВ РОЗВИТКУ РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РИБНИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ**

**Є. Г. Міхнєва, Т. В. Ковалінська, В. І. Сахно**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Наводяться результати досліджень механізмів радіаційно стимульованої модифікації складних органічних сполук в харчовій сировині з гідробіонтів. Аналізується фактичний асортимент цієї сировини в Україні. Встановлено різке зменшення об'ємів надходження сировини, та втрати її якості.

Обґрунтовується необхідність досліджень і розробок радіаційних технологій в реаліях динаміки вітчизняної сировинної бази. Доведено необхідність досліджень механізмів радіаційно стимульованої модифікації органічної сировини вітчизняного виробництва і створення наукової основи переходу на виробництво рибних харчових продуктів з прісноводної рибної сировини та сировини з доступних областей Азово-Чорноморського басейну.

Визначаються цілі досліджень та завдання на розробку нових радіаційних технологій. Показано, що на даний час ще не в повній мірі використано переваги технологій модифікації харчової сировини з використанням низько енергетичних іонів атмосферних газів (аероіонів). Обґрунтовується, що за технологічними та економічними показниками це може бути найбільш оптимальний шлях прогресу радіаційних технологій в найближчий період. Обговорюються наукові проблеми, які необхідно вирішити, аналізуються методичні і технічні питання здійснення досліджень.

## ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕБІГУ СПЕРМАТОГЕНЕЗУ ПІСЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ГАММА-ОПРОМІНЕННЯ ТЕСТИКУЛ ЛАБОРАТОРНИХ ЩУРІВ

**О. А. Мотрина, О. В. Трофіменко, К. С. Андрейченко, О. С. Ватліцова,  
А. В. Клепко, С. В. Андрейченко**

*ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України», Київ*

Наслідки Чорнобильської катастрофи та значне зростання забрудненості навколишнього середовища в останні десятиліття зумовило прискорений розвиток негативних тенденцій в динаміці зміни стану репродуктивного здоров'я чоловічого населення України. В результаті спостерігається неухильне зменшення народжуваності в країні, а також поширення серцево-судинних, нервових та онкологічних захворювань. Згідно із законами радіобіології, клітини сперматогенного епітелію є найбільш радіочутливими порівняно з іншими клітинами та тканинами, оскільки вони перебувають в стані постійної проліферації та мейотичного поділу. Тому використання радіотерапії при лікуванні онкозахворювань або тривале проживання на радіоактивно забруднених територіях можуть стати саме тими чинниками, котрі дуже часто призводять до порушення сперматогенезу, загибелі статевих клітин, появи азооспермії і чоловічої інфертильності.

Робота присвячена з'ясуванню впливу різних доз іонізуючої радіації на сперматогенез та спермоутворення при локальному опроміненні тестикул щурів гамма-променями.

Локальне опромінення тестикул тварин здійснювали на установці «РОКУС» (джерело гамма-квантів –  $^{60}\text{Co}$ ; потужність поглинутої дози 106,6 сГр/хв) в дозах 1,0, 2,0, 4,0 та 7,0 Гр. Все тіло тварин, окрім тазової частини, було захищене свинцевим жилетом. Тварин декапітували через 7, 21, 45 діб після тотального опромінення. Мікроскопічний аналіз особливостей розподілу гермінативних клітин та клітин Сертолі по різних стадіям сперматогенезу проводили на тотальних препаратах звивистих сім'яних каналців та на поперечних зрізах сім'яників з використанням забарвлення клітин періодат-фуксином та гематоксиліном.

З'ясована динаміка кількісних змін заселення епітелію звивистих сім'яних каналців лабораторних щурів як соматичними клітинами Сертолі, так і різними типами гермінативних клітин, зокрема А-сперматогоніями, сперматоцитами, сперматидами та сперміями в залежності від дози гамма-опромінення тварин та тривалості пострадіаційного періоду. Показано, що дія радіації майже не позначається на кількості клітин Сертолі в сім'яних каналцях, тоді як дози 1,0 - 2,0 Гр спричиняють загибель диференційованих А-сперматогоній і зменшення їх кількості порівняно з контролем на 60 - 80 %. Завдяки більшій радіорезистентності сперматоцитів, сперматид та сперміїв помітне радіоураження цих клітин з'являлось при дозах 4,0 та 7,0 Гр, причому в дру-



тому випадку спостерігалось переважно спустошення сім'яних каналців і збереження в середньому не більше 0,5 клоноутворюючих стовбурових сперматогоній на кожні 4 мкм довжини каналця. Дози опромінення 1,0 та 2,0 Гр майже не позначались на кількісному спермоутворенні, спричиняючи лише появу морфологічних аномалій в структурі сперматозоїдів. При дозах 4,0 та 7,0 Гр спостерігалось суттєве пригнічення сперматогенезу та утворення життєздатних сперматозоїдів, що спричиняло появу в епідидимальному біоптаті переважно безхвостих та безакросомних сперматозоїдів.

## **УРОВЕНЬ ПРОЯВЛЕНИЯ РОСТОВЫХ РЕАКЦИЙ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНДОГЕННОГО ПРОЛИНА У ПРОРОСТКОВ ГОРОХА В ОТВЕТ НА РАЗНЫЕ КОМБИНАЦИИ СТРЕССОРОВ**

**О. Г. Нестеренко, Н. М. Рашидов, Д. М. Гродзинський**

*Институт клеточной биологии и генетической инженерии  
НАН Украины, Киев*

Влияние каждого из стрессовых факторов в частности уже хорошо изучено, однако в естественных условиях организмы подвергаются их совместному воздействию, что может влиять на урожайность растений и скорость их старения. Вопрос о механизмах адаптации к нескольким стрессорам в настоящее время наименее исследован. При сочетании стратегий ответа на каждый из стрессоров, возникает так называемое «перекрестное совещание» сигнальных систем, то есть кроссток, обеспечивающий адекватный ответ организма и формирующий биохимический инструментарий для осуществления его активной реакции. Определение ростовых характеристик начинали с воздействия стрессорами на 3-х суточные проростки гороха посевного (*Pisum sativum L.*), как объекта, не относящегося к группе устойчивых по изучаемым в работе факторам. После последовательного влиянию стрессорами растения продолжали культивироваться в водной культуре. Для определения модифицирующего действия ионизирующей радиации использовалось острое гамма-облучение в дозах 0 - 20 Гр; с последующим воздействием 0,17 - 0,23 Моль солевым раствором (NaCl, 1 час) или тепловым шоком (45 °С, 4 мин). Следствием стресса является индуцирование адаптивных механизмов, связанных с синтезом и накоплением стрессовых гормонов, БТШ, антиоксидантов, осмолитов и других защитных соединений, в частности пролина. Сложность изучения данной проблемы заключается в том, что усиление биосинтеза одного из низкомолекулярных соединений влечет за собой изменения в метаболизме и перераспределение пула субстратов и энергетических затрат. Так, стресс-зависимый биосинтез пролина, требует большего количества глутамата, необходимого и для других метаболических путей. Была изучена концентрация пролина, как универсального стресс-протекторного метаболита, у всех экспериментальных группах растений (определяли по методу Bates (1973)). На основе ряда опытов, по морфометрическим

показателям, інтегрально характеризуючих молекулярно-генетическіе, структурні і метаболіческіе змінення рослин, виділялись відповідні дози і комбінації стресорів, аналізуючи які можна визначити роль сигнальних систем на прикладі вивчення концентрації і спектра стресових білків. Аналіз ростових показателів проростів гороха вимірюванням довжини головного корня з 2-го по 8-й день після впливу стресорами показав наступне. Рівень відхилення в сторону синергізму або антагонізму во взаємодії стресорів може вказувати на проявлення явища кроссток, що ми спостерігали через 2 і 4 дні після облучення в дозі 10 Гр і впливу обох типів стресорів. Крім того, на 2-й день вимірювань стимуляція росту після облучення в 5 Гр спостерігалась при впливі всіх концентрацій солі. Індекс росту коренів рослин за 8 днів, не враховуючи невеликі коливання, вказало на радіомодифікуючі властивості як солевого, так і теплового впливу після високих доз облучення – від 15 Гр. Рівень проліна рослин після солевого стресу був вище при облученні більшими дозами (10 - 20 Гр), в той же час тепловий шок значно підвищував його при малих дозах – в діапазоні до 5 Гр. Можливо передбачити, що стійкість рослин до досліджуваних стресорів частково корелювала з рівнем накопичення проліну. Проведення експериментів з абіотическими факторами різної природи свідчить про те, що деякі дози іонізуючого випромінювання можуть підвищувати стійкість рослин до інших типів стресу. В основі цього може лежати здатність індукувати в рослинах накопичення низкомолекулярних антиоксидантів, зокрема проліну, які знижують інтенсивність окислювального стресу, що супроводжується підвищенням стійкості до наступного впливу солевого або гіпертермічного шоку.

## **ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ГІПОФІЗАРНО-ТИРЕОЇДНОЇ, ГІПОФІЗАРНО-ГОНАДНОЇ СИСТЕМ ЕНДОКРИННОЇ РЕГУЛЯЦІЇ ТА ВУГЛЕВОДНОГО ОБМІНУ У БІЛИХ ЛАБОРАТРИХ ЩУРІВ ПЕРШОГО ПОКОЛІННЯ, НАРОДЖЕНИХ ВІД ТВАРИН, ЯКІ ЗАЗНАЛИ ВПЛИВУ ІНКОРПОРОВАНОГО <sup>131</sup>I**

**Є. М. Прохорова<sup>1</sup>, О. А. Бойко<sup>1</sup>, О. Я. Плєскач<sup>1</sup>,  
І. Р. Дмитрієва<sup>1</sup>, О. В. Копилова<sup>1</sup>, Н. П. Атаманюк<sup>1</sup>,  
І. П. Дрозд<sup>2</sup>, А. І. Липська<sup>2</sup>, В. В. Талько<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup> ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини  
НАМН України, Київ*

*<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Вивченню віддалених медичних наслідків аварії на ЧАЕС, спричинених впливом інкорпорованого <sup>131</sup>I, приділяється достатньо уваги. Зростання захворюваності на рак щитоподібної залози після Чорнобильської катастрофи серед осіб групи підвищеного ризику (0 - 18 років на час аварії) визнане спеціаліста-

ми як головний медичний наслідок аварії на ЧАЕС (стохастичні наслідки) [1].  $^{131}\text{I}$  створює значні поглинуті дози в щитоподібній залозі, яка є одним з основних регуляторів метаболізму в організмі [2]. Наукові дослідження та клінічні спостереження, проведені упродовж всього післяаварійного періоду, засвідчують погіршення здоров'я дітей, народжених від батьків, які зазнали опромінення внаслідок аварії на ЧАЕС, при тому суттєве місце в зростанні захворюваності посідають ендокринні порушення [3]. Негативний вплив комплексу чинників Чорнобильської аварії на ендокринну систему призвів до розвитку гормональних порушень енергетичних механізмів регуляції маси тіла, зміни поведінкових харчових реакцій, збільшення випадків формування надлишку маси тіла, дисліпідемій, оксидативного стресу, що опосередковано сприяло виникненню порушень жирового та вуглеводного обмінів та інших патологічних станів. Вивчення ефектів, що пов'язані зі станом ЩЗ дітей, які народилися від батьків з опроміненою ЩЗ, є вкрай актуальним враховуючи, що ці особи на момент аварії перебували в дитячому та підлітковому віці та отримали дозу опромінення ЩЗ (0,15 - 0,75 Гр), а на даний час є батьками дітей першого покоління, народжених після аварії на ЧАЕС.

В експериментальному дослідженні на 48 статевозрілих білих лабораторних щурах обох статей в особин першого покоління, народжених від тварин, які зазнали впливу інкорпорованого  $^{131}\text{I}$  (створена модель опромінення шляхом одноразового перорального введення радіонукліда, внаслідок чого сформовані дози опромінення щитоподібної залози у самців в діапазоні 3,5 - 3,8 Гр, у самок – 5,4 - 5,9 Гр), визначені зміни вмісту тиреотропного гормону, естрадіолу та тестостерону, концентрації глюкози, збільшення маси тіла, що вказують на дискоординацію функціонування гіпофіз-тиреоїдної, гіпофіз-гонадної ланок ендокринної регуляції, порушення вуглеводного обміну.

1. *Tronko M., Bogdanova T., Saenko V. et al.* Thyroid cancer in Ukraine after Chernobyl: dosimetry, epidemiology, pathology, nuclear biology // IN-TEX, Nagasaki, Japan. - 2014. - 175 P.
2. *Дрозд І.П., Липська А.І., Сова О.А.* Особливості формування доз опромінення щитоподібної залози та протирадіаційний захист за тривалого надходження радіоактивних ізотопів йоду // Радіоекологія -2014: Матеріали наук.-практ. конф. з міжнародною участю (Київ, 24 - 26 квітня 2014 р.). - Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2014. - С. 120 - 125.
3. *Копилова О.В., Степаненко О.А.* Особливості функціонування гіпоталамо-гіпофізарно-тиреоїдної системи у дітей, народжених від осіб опромінених внаслідок аварії на ЧАЕС // Український радіологічний журнал. - 2015. - № 3. - С. 289 - 291.

# ЦИТОГЕНЕТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ХВОРИХ НА МІСЦЕВОПОШИРЕНИЙ РАК ШИЙКИ МАТКИ В ХОДІ КОНФОРМНОЇ ПРОМЕНЕВОЇ ТЕРАПІЇ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ ФРАКЦІОНУВАННЯ ДОЗИ ОПРОМІНЕННЯ

**Н. М. Рябченко<sup>1</sup>, В. С. Іванкова<sup>2</sup>, Л. М. Барановська<sup>2</sup>,  
Т. М. Нестеренко<sup>2</sup>, А. І. Липська<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень, НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Національний інститут раку, Київ*

Метод конформної променевої терапії (КПТ) у поєднанні з різними режимами фракціонування дози опромінення онкологічних хворих в останні роки відкриває перспективи підвищення ефективності терапії, мінімізації променевого навантаження на критичні органи, прояви гострої та віддаленої токсичності в нормальних тканинах на фоні локального контролю величини та потужності терапевтичної дози опромінення. Проведений цитогенетичний супровід КПТ хворих на місцево-поширений рак шийки матки (МП РШМ) включав оцінку *in vivo* генотоксичних ефектів опромінення на соматичні клітини пацієнтів в режимах стандартного фракціонування та прискореного гіперфракціонування дози, що включав аналіз метафазних хромосом лімфоцитів периферичної крові (ЛПК) в ході курсу КПТ.

Матеріалом досліджень були Т-лімфоцити первинних хворих на МП РШМ, що отримували курс КПТ на апараті «Clinac-2100 CD» (ЛПЕ з енергією гальмівного випромінювання 6 МеВ) у 2-х режимах: стандартного опромінення з разовою вогнищевою дозою (РВД) 2 Грх1 р/день на область малого тазу до сумарної вогнищевої дози (СВД) 45–46 Гр (контрольна група, 9 пацієнтів) та прискореного фракціонування дози опромінення – РВД 1,3 Грх2 р/день з інтервалом 4 год до СВД 39 Гр на пухлинний осередок і СВД 44 Гр – на лімфатичні вузли малого таза (10 пацієнтів). Цитогенетичний аналіз метафазних хромосом ЛПК включав визначення загальної частоти аберацій хромосом та частоти променевих маркерів в різні терміни: до початку КПТ, після першого сеансу опромінення та після закінчення курсу КПТ.

Дані цитогенетичного моніторингу свідчать, що режим прискореного гіперфракціонування дози опромінення при КПТ хворих на резистентні форми РШЗ мав радіобіологічні переваги у порівнянні з традиційним фракціонованим опроміненням щодо генотоксичних ефектів, індукованих в нормальних клітинах. Підведення 2-х фракцій на день з переривом у 4 год знижувало навантаження на ЛПК за рахунок сублетальних пошкоджень і виявлялось у зниженні динаміки накопичення нестабільних аберацій хромосом (променевих маркерів) в ЛПК пацієнтів як в ході КПТ (у 1,4 рази після першого сеансу), так і після закінчення курсу (у 1,2 рази). При цьому у пацієнтів дослідної групи виявлено вищі, ніж в контрольній групі, показники повної (21,4 та 18,3 % відповідно) та часткової регресії пухлини (50,0 та 42,1 % відповідно)

на фоні відсутності надмірної токсичності (вище II ступеня).

Таким чином, КПТ хворих на МП РШМ з використанням режиму прискореного фракціонування дози опромінення у порівнянні із КПТ в стандартному режимі характеризувалась вищою ефективністю, відсутністю надмірної токсичності та значному зменшенні променевих навантажень на нормальні тканини.

## **ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ГОРМОНАЛЬНОГО ДИСБАЛАНСУ ПІСЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ОПРОМІНЕННЯ ТЕСТИКУЛ ЩУРІВ ГАММА-ПРОМЕНЯМИ**

**Л. В. Саковська, Л. В. Горбань, Ю. А. Кондратова,  
І. Т. Гавриш, А. В. Клепко, С. В. Андрейченко**

*ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України», Київ*

На теперішній час показано, що клітини сперматогенного епітелію функціонують за умов складної нейрогуморальної регуляції, яка здійснюється гормонами гіпофізу (фолікулостимулюючим та лютеїнізуючим гормонами), стероїдними гормонами, що виробляються клітинами Лейдига (тестостерон,  $17\beta$ -естрадіол) та Сертолі (дигідротестостерон), а також пептидними гормонами клітин Сертолі (інгібін Б, анти-Мюллеровий гормон, андрогенз'язуючий протеїн) в яєчках. Крім того, встановлено, що спермоутворююча функція генеративного епітелію за своєю активністю може бути охарактеризована на підставі визначення деяких біологічно активних речовин, зокрема інгібінів, активінів, анти-Мюллерового гормону, зв'язуючого білку статевих гормонів, інтерлейкіну-6 тощо. Деякі з цих та інших речовин за всіма ознаками можуть бути віднесені до прогностичних маркерів сперматогенезу, причому на особливу увагу заслуговують саме ті з них, що регулюють певні стадії сперматогенезу або утворюються внаслідок функціональної активності сперматогенного епітелію.

Локальне опромінення тестикул тварин здійснювали на установці «РОКУС» (джерело гамма-квантів –  $^{60}\text{Co}$ ; потужність поглинутої дози 106,6 сГр/хв) в дозах 1,0, 2,0, 4,0 та 7,0 Гр. Все тіло тварин, окрім тазової частини, було захищене свинцевим жилетом. Тварин декапітували через 7, 21, 45 діб після тотального опромінення. Вміст гормонів в сироватці крові лабораторних щурів в різні терміни після опромінення визначали за допомогою імуноферментних наборів ELISA виробництва фірми DRG (Німеччина). Всі вимірювання проводили на автоматичному імуноферментному аналізаторі CHEM WELL.

В проведених дослідках було показано, що концентрація ФСГ та ЛГ у сироватці крові тварин зростає при збільшенні дози опромінення, тоді як концентрація тестостерону, навпаки, зменшується. Ці дані мають вказувати на порушення гормон-рецепторної взаємодії ФСГ з клітинами Сертолі, а ЛГ – з клітинами Лейдига. Крім того, падіння рівню анти-Мюллерового гормону та

інгібіну В паралельно зі зростанням ФСГ підтверджує думку, що ФСГ крім нейрорегуляції через гіпоталамус та гонадотропін-рилізінг-фактор, з одного боку, може також регулюватись тестостероном, інгібіном В та анти-Мюллеровим гормоном на рівні гіпофізу.

Як виявилось, посилення радіаційного навантаження на тестикули зумовлювало одночасне зростання естрадіолу та ЛГ і, навпаки, зниження концентрації тестостерону, інгібіну В та анти-Мюллерового гормону, причому останні два гормони діяли за принципом «все або нічого», що зумовляло їх наявність в крові при здійсненні сперматогенезу і повну їх відсутність при спустошенні сім'яних каналців.

Крім того, проведені дослідження показали, що концентрація інгібіну В і анти-Мюллерового гормону в сироватці крові можуть слугувати інформативними біомаркерами розвитку радіаційного ураження в епітелії звивистих сім'яних каналців та пошкодження спермопродукуючої функції гонад і епідидимісів.

## **ЦИТОГЕНЕТИЧНІ ЕФЕКТИ В КІСТКОВОМУ МОЗКУ ЩУРІВ ПРИ ТРИВАЛОМУ НАДХОДЖЕННІ $^{131}\text{I}$**

**О. А. Сова, І. П. Дрозд**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Досліджували цитогенетичні ефекти в кістковому мозку (КМ) щурів за різних умов опромінення  $^{131}\text{I}$ . Експерименти проводили на двох групах тварин: 1 група - щоденне надходження до організму впродовж 15 діб по 29,3 кБк/тварину (стале надходження); 2 група - щоденне надходження впродовж 14 діб ізотопу, первинна активність якого становила 32,3 кБк/тварину. У кожний наступний день активність, що надходила до організму, зменшувалась на величину добового радіоактивного розпаду (змінне тривале надходження). Тваринам масою  $240 \pm 30$  г. перорально через зонд вводили розчин натрію йодиду ( $\text{Na}^{131}\text{I}$ ) у дистильованій воді відповідної активності. Тварин умертвляли згідно з робочим графікам з дотриманням вимог ст. 26 Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження». Вміст ізотопу в ЩЗ та кістковому мозку в динаміці проведення експериментів визначали на  $\gamma$ -спектрометрі з напівпровідниковим детектором. При розрахунку дози, поглиненої у КМ, урахували додаткове  $\gamma$ -опромінення від йоду, що утримується в ЩЗ та в шкірі за власною методикою [1].

Цитогенетичний аналіз проводили в пластинках клітин КМ на стадії метафази. Аналіз препаратів здійснювали методом візуального каріотипування під світловим мікроскопом зі збільшенням  $\times 1000$ . Враховували аберації хроматидного і хромосомного типів, а саме: обміни, одиночні та парні фрагменти, ацентричні кільця, дицентричні, кільцеві, атипові хромосоми та геномні аберації. Проаналізовано 28500 метафазних пластинок. Статистичну обробку

дозиметричних даних здійснювали за t-критерієм Стьюдента; цитогенетичних – за точним критерієм Фішера. Статистично значущими вважали відмінності при рівні значимості  $p \leq 0,05$ .

В обох експериментах цитогенетичні ефекти мали однонаправлений характер. Зміни відбувались, в основному, за рахунок типових маркерів радіаційної дії: дицентричних хромосом з супроводжуючими парними фрагментами і вільних парних фрагментів [2]. Накопичення цих аберацій спостерігали вже з першої доби, а їх максимальний рівень зареєстровано на третю добу. У більш віддалені терміни - на 7 (8) і 15 (14) доби, реєстрували зменшення їх кількості. Відбувалось поступове накопичення атипових хромосом, але вірогідним воно було лише в експерименті зі сталим опроміненням. Суттєвих відмінностей за частотою аберацій хроматидного типу, які згідно із [2] є цитогенетичним маркерами дії хімічних та деяких біологічних агентів, не виявлено. В експерименті зі сталим надходженням ізотопу зі збільшенням дози опромінення реєстрували і статистично значуще зростання кількості поліплоїдних клітин. За сталого опромінення дозове навантаження було суттєво більшим ніж за змінного тривалого і, відповідно, цитогенетичні ефекти були більш вираженими.

1. *Сова О.А., Дрозд І.П.* // Ядерна фізика та енергетика, 2014. - Т. 15, № 4. - С. 359 - 369.
2. *Деміна Э.А., Баріляк И.Р., Пилинская М.А.* Словарь по радиационной цитогенетике. - К.: Вісник, 1994. - 125 с.

**КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ  
УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЛАБОРАТОРІЇ ЯДЕРНОЇ КРИМІНАЛІСТИКИ  
ЦЕНТРУ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ  
ІНСТИТУТУ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ**

**В. В. Тришин, О. В. Божок, Г. Я. Мінчук**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Ядерна криміналістика важлива ланка системи фізичної ядерної безпеки (ФЯБ). ФЯБ це різностороння діяльність із запобігання ядерному тероризму: захист ядерних об'єктів, ядерних та інших радіоактивних матеріалів, запобігання їх незаконному обігу (крадіжки, диверсії, незаконні передачі тощо) і реагування на такі дії. За рекомендаціями МАГАТЕ ядерні криміналістичні лабораторії (аналітичні) мають розглянути доцільність впровадження СУЯ або на базі стандартів ISO 9000 або ISO 17025 з метою забезпечення достовірності зібраних даних і висновків їх інтерпретації в процесі ядерної криміналістичної експертизи (ЯКЕ). Відповідальність за ФЯБ покладається на кожну державу, але наслідки інциденту не обмежуються територією однієї країни. Необхідність впровадження СУЯ ЛЯК ІЯД визначається тим, що ре-

зультати ЯКЕ є доказами в разі притягнення правопорушників до кримінальної відповідальності а також можуть вплинути на оцінку міжнародною спільнотою ступеню загрози розповсюдження ядерної зброї і рівня терористичної загрози. СУЯ передбачає впровадження документально оформлених процедур контролю і аналізу зразків, що дає змогу покращити рівень відтворюваності і простежуваності результатів ЯКЕ і створює механізм сприяння постійному вдосконаленню якості, а також сприяє зростанню довіри з боку зовнішніх сторін.



Необхідність розробки інтегрованої СУЯ (ІСУЯ) пов'язана з обов'язковим врахуванням а рамках однієї системи вимог до аналітичної лабораторії та забезпечення радіаційної та екологічної безпеки, що особливо важливо при управлінні роботою ЛЯК, зброї в якому можуть мати непередбачувані наслідки.

З метою побудови ефективної ІСУЯ ЛЯК використано системний підхід, що базується на поєднанні операцій аналізу і синтезу, а на практиці реалізується за ітеративним принципом. Першим кроком стала розробка абстрактної концептуальної моделі, в яку включено лише релевантні компоненти відносно цілей. Така проста модель надалі ускладнюється відповідно до внутрішніх потреб ЛЯК та зовнішніх вимог.

## **ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРЕХ ОБЛУЧЕННЫХ ПОКОЛЕНИЙ *CLADOSPORIUM CLADOSPORIOIDES* ПРИ ДЕЙСТВИИ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ХРОНИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

**А. В. Тугай<sup>1</sup>, Т. И. Тугай<sup>1</sup>, В. А. Желтоножский<sup>2</sup>, М. В. Желтоножская<sup>2</sup>,  
Л. В. Садовников<sup>2</sup>, А. А. Квашук<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт микробиологии и вирусологии НАН Украины, Киев*

<sup>2</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

В настоящее время чрезвычайно актуальным является комплексный анализ отдаленных последствий воздействия повышенного уровня радиации на микробиоту, который включает всестороннее изучение реакций-ответов микроорганизмов на различных уровнях их иерархической организации в действие облучения.



Особый интерес представляет изучение таких видов грибов, в которых, как было установлено, сформировались, новые, ранее не известные, радиоадаптивного свойства, проявляющиеся в положительной реакции на действие больших доз радиации и повышении биологической активности и которые, при этом, являются первичными звеньями трофических цепей, причинными агентами заболеваний и продуцентами биологически активных соединений.

Поэтому целью данной работы было изучение физиолого-биохимических свойств трех облученных поколений *Cladosporium cladosporioides* при действии низкоинтенсивного хронического облучения.

Объектами исследования были два штамма *Cladosporium cladosporioides*, 4061 - контрольный, который был выделен из территории с фоновым уровнем радиации и 4, облученный, выделенный из почвы 10 км зоны ЧАЭС и имел радиоадаптивные свойства.

При исследовании изменений на организменном уровне с использованием интегрального показателя роста микроскопических грибов – скорость радиального роста, было выявлено, что при росте на сусле агаре обнаружен разный характер изменений в поколениях у контрольного штамма и штамма с радиоадаптивными свойствами. Выявлен одинаковый характер изменений в поколениях при росте на голодном агаре у контрольного штамма и штамма с радиоадаптивными свойствами – а именно снижение в первом и втором и увеличение в третьем.

При исследовании изменений на внутриклеточном уровне мы изучили функционирование системы антиоксидантной защиты - активности ферментов супероксиддисмутазы, каталазы и пероксидазы. Был выявлен разный характер изменений активности супероксиддисмутазы в поколениях у контрольного штамма и штамма с радиоадаптивными свойствами. Также выявлен разный характер изменений в поколениях у каталазы у контрольного штамма и штамма с радиоадаптивными свойствами. Был выявлен одинаковый характер изменений активности в поколениях у контрольного штамма и штамма с радиоадаптивными свойствами у пероксидазы, такой как увеличение в первом и втором и снижение в третьем.

Обнаружены волнообразные изменения скорости радиального роста и активностей ферментов антиоксидантной защиты что может свидетельствовать о реализации у них различных адаптационных стратегий к хроническому ионизирующему облучению.

**DECOMPOSING RADIOACTIVE HOT PARTICLES  
FOUND IN THE CHERNOBYL EXCLUSION ZONE  
BY MICROSCOPIC FUNGI *CLADOSPORIUM CLADOSPORIOIDES***

**T. I. Tugay<sup>1</sup>, V. A. Zheltonozhsky<sup>2</sup>, M. V. Zheltonozhskaya<sup>2</sup>,  
A. V. Tugay<sup>1</sup>, L. V. Sadovnikov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Zabolotny Institute of Microbiology & Virology,  
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

<sup>2</sup>*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

Small fragments of nuclear fuel (hot particles) fall into the environment as a result of radiation accidents. Objective of the given work was a studying of capacity micro fungus *Cladosporium cladosporioides* to transformation of hot particles with high specific activity of  $\alpha$ -radiator <sup>241</sup>Am.

In this work were used hot particles isolated from soil of exclusion zone of Chernobyl NPP. First hot particle had concentration activity of <sup>241</sup>Am – 364 Bq and 3420 Bq of <sup>137</sup>Cs. Second hot particle had concentration activity of <sup>241</sup>Am – 908 Bq and 6590 Bq of <sup>137</sup>Cs. Investigation of interaction fungi and hot particles were in liquid Chapek's medium, which consisted 1g/l glucose.

Fungal accumulation of <sup>241</sup>Am and <sup>137</sup>Cs released from first intact hot particles was shown to consist 0,165Bq and 0,465Bq, accordingly.

The part of releasing activity from first hot particle was shown to be greater for americium –  $(6.3 \pm 0.5) \cdot 10^{-2}$  Bk/g than cesium –  $(1.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-2}$  Bk/g.

Fungal accumulation of <sup>241</sup>Am and <sup>137</sup>Cs released from second intact hot particles was shown to consist 1.28 and 0.35 Bq accordingly.

The part of releasing activity from second hot particle was shown to be greater for americium –  $(2.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-2}$  Bk/g than cesium –  $(1.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-2}$  Bk/g.

We would like to note that in the liquid activities of cesium and americium were in the same ratio as in the hot particles.

It was established that *Cladosporium cladosporioides* was shown capacity to decomposition investigated hot particles. In spite on that in structure of particles prevails <sup>137</sup>Cs releasing activity under exposure of fungi to be greater for <sup>241</sup>Am.

Thus the capacity to acquire radionuclides in these fungi is determinate by an interaction between physical nature of radioactive source and fungal species.

Americium is one of the most dangerous to the person and an environment radionuclide, in connection with its high toxicity, carcinogenicity and thus a great half-life period. In this connection the special attention is deserved with studying character of interoperability of americium with micro fungi since microbiological processes can play a crucial role in decomposition and migrations of radionuclide in an environment.

## ДЕТЕКТУВАННЯ НАКОПИЧЕННЯ СТРОНЦІЮ В ТРАНСГЕННИХ РОСЛИНАХ КУКУРУДЗИ МЕТОДОМ ICP-MS

**В. В. Швартау, Л. М. Михальська, С. І. Михальська, О. М. Тищенко**

*Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, Київ*

Відомості про накопичення радіонуклідів у системах ґрунт-рослина регіонів, що постраждали від аварії на Чорнобильській АЕС, все ще недостатні. Хоча в екоценозах Іванківського та Поліського районів Київської області зберігається досить високий рівень забруднення й детектується значна кількість радіоактивних ізотопів, частину площ регіону пропонується використовувати для вирощування ряду культурних рослин на технічні цілі. Очевидно, що сорти даних видів рослин повинні характеризуватися низьким зольним індексом та накопичувати низькі рівні радіонуклідів.

Серед небезпечних ізотопів, якими забруднено ґрунти півночі Київської області, у досить великих кількостях міститься стронцій-90. Роботи з визначення відмінностей у вмісті цього елемента у ГМ-рослинах нам не відомі. Для дослідження рівня накопичення стронцію нами використані трансгенні рослини кукурудзи (*Zea mays* L.) з дволанцюговим РНК-супресором гена проліндегідрогенази, для яких характерним є підвищений рівень вільного проліну та стійкості до абіотичних стресів.

У дослідах рослини вирощували на темно-сірому опідзоленому ґрунті, піщано-легкосуглинковому за механічним складом, відібраному у березні 2015 року у Дослідному сільськогосподарському виробництві ІФРГ НАН України (Київська область). Вміст гумусу 1,8 %, рН (сольовий) 5,8. Визначення вмісту стронцію у зерні проводили на емісійному мас-спектрометрі з індуковано зв'язаною плазмою ICP-MS «Agilent 7700х» після озолення зразків в ICP-grade азотній кислоті за допомогою мікрохвильової пробопідготовки Milestone Start D.

Виявлено, що насіння трансгенних рослин кукурудзи характеризувалося низьким рівнем накопичення стронцію, в порівнянні з контрольними варіантами (статистично достовірне зниження вмісту стронцію майже в 2 рази). Даний ефект відтворювався у дослідах й може бути пов'язаний з поліфункціональною активністю вільного проліну як стресового протектору.

Таким чином, трансгенні рослини кукурудзи з дволанцюговим РНК-супресором гена проліндегідрогенази є перспективними для створення сортів й гібридів з низьким зольним індексом та для розробки технологій отримання екологічно безпечних урожаїв культурних рослин з пониженим вмістом стронцію.

Аналітичні дослідження проводили за сприяння проекту INSC Program 2011: Health and Ecological Programmes around the Chernobyl Exclusion Zone.

## АНАЛІЗ ІОНОМУ ЗРАЗКІВ ҐРУНТІВ УКРАЇНИ, ВІДБРАНИХ ДО 1945 Р.

**В. В. Швартау<sup>1</sup>, А. В. Кохан<sup>2</sup>, Л. М. Михальська<sup>1</sup>, Л. Д. Глущенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Полтавська державна сільськогосподарська дослідна станція  
ім. М. І. Вавилова ІС і АПВ, Полтава*

Презиційний аналіз ґрунтів Іванківського та Поліського районів Київської області, а також ґрунтів інших регіонів України, є важливою складовою проекту Європейського парламенту «INSC Program 2011: Health and Ecological Programmes around the Chernobyl Exclusion Zone». Для аналізу забруднення ґрунтів необхідні порівняння з елементним складом контрольних, «чистих» ґрунтів. В якості контрольних зразків можуть бути використані зразки ґрунтів та рослин, які відібрані до 1945 р., або до періоду масштабних повітряних випробувань ядерної зброї 1949 - 1962 рр.

У світі відома лімітована кількість тривалих беззмінних дослідів у рослинництві. Зразки, які щорічно відбиралися з цих дослідів є унікальними щодо визначення складу іоному ґрунтів і рослин та його відмінностей до періоду випробувань ядерної зброї й у наш час. Вивченням беззмінних культур вперше зайнялися в Ротамстеді (Англія), де в 1843 р. були закладені дослідні ділянки з беззмінним посівом пшениці озимої. В аналогічному досліді у Галлі (Німеччина) з 1885 р. вирощували жито.

В Україні дослід по беззмінному вирощуванню жита на Полтавській державній сільськогосподарській дослідній станції ім. М. І. Вавилова ІС і АПВ закладено у 1884 р. Ґрунт – темно сірий опідзолений. На відміну від досліджень у Західній Європі, де вносяться органічні і мінеральні добрива, щоб покрити щорічний дефіцит у ґрунті поживних речовин винесених урожаєм основної та побічної продукції, на Полтавській дослідній станції добрива не вносяться. Відповідно, рівень контамінації ксенобіотиками при цьому є мінімальним. В середньому за 131 рік досліджень урожайність зерна жита озимого становила 11,6 ц/га, а соломи - 28,0 ц/га. Дослідження динаміки вмісту гумусу в ґрунті протягом років проведення досліджень дало можливість встановити, що за 127 років втрати його в 0 - 20 см шарі ґрунту становили 55 % або 13,5 т/га.

Вміст легкозасвоюваних поживних речовин і кислотність ґрунту, показники динаміки та зміни їх проходять на відносно стабільному рівні.

Нами визначено елементний склад зразків ґрунту, відібраних фахівцями Полтавської дослідної станції у 1944 р., а також зразків ґрунту беззмінного досліді, які відібрані у 2014 р. Зразки аналізували на ICP-MS «Agilent 7700x» після озолення наважок в ICP-grade азотній кислоті на мікрохвильовій пробопідготовці Milestone Start D. У якості калібрувальних стандартів використовували розчини Multielement standard solution 5 for ICP (Fluka).

Проведений аналіз відмінностей складу іону грунту протягом 70 років показує різну їх динаміку. Так, якщо, вміст Li, Mo, Ti та Be зменшився за цей період у 2,1, 2,8, 2,3 і 2,8 рази, а Ni, Cd, Ag, Bi у 1,2, 1,4, 1,6 і 1,6, то інші елементи живлення (Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, In, Ga, Rb, Sr, Cs, Ba, Pb) були практично на одному концентраційному рівні, а величина варіабельності їх вмісту у ґрунті знаходилися у межах 0,96 - 1,07 раза.

Таким чином, експериментальний матеріал досліду з беззмінного вирощування жита на Полтавській державній сільськогосподарській дослідній станції ім. М. І. Вавилова може бути використаний в якості контрольних, «чистих» зразків ґрунту й дасть змогу проводити порівняння змін іонів зразків ґрунтів, відібраних у період до та після ядерних випробувань зброї.

Аналітичні дослідження на ICP-MS Agilent 7700x виконано за сприяння проекту «INSC Program 2011: Health and Ecological Programs around the Chernobyl Exclusion Zone».

## **НЕІНВАЗИВНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ТА ЛОКАЛІЗАЦІЇ НЕЙТРОНО-ЗАХВАТНИХ АГЕНТІВ *IN VIVO***

**Ю. Б. Шевченко<sup>1</sup>, В. В. Тришин<sup>1</sup>, Т. М. Малишева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Університет Вісконсин, Грін Бей, США*

Описані неінвазивні способи *in vivo* кількісного визначення біорозподілу нейтронозахватних агентів (НЗА) - носіїв бору та/або гадолінію. Два способи базуються на на відомих і добре розроблених фізичних моделях і методиках ядерної фізики. В них використовується той факт, що ядра <sup>10</sup>B і <sup>157</sup>Gd мають перерізи поглинання нейтронів на порядки більші, ніж ядра інших елементів біологічних об'єктів. Перший з ядерно-фізичних методів одержав назву „трансмійна комп'ютерна томографія” (ТКТ). За оцінками, при експозиції на пучку порядку 3 хв точність методу може досягти 10% при концентрації <sup>10</sup>B 2000 ppm, а просторова роздільна здатність 2 мм. В іншому способі реєструється пропущений через коліматор потік гамма квантів, які випромінюються в момент захвату нейтронів ядрами, і тому одержав назву «*in vivo* нейтронно-активаційний аналіз по миттєвих гамма-променях» (IVPGAA). Точність методу - 30 %. Важливо, що і перший і другий методи можуть застосовуватись одночасно з сеансом нейтронозахватної терапії (НЗТ).

Друга група методів ґрунтується на ядерному магнітному резонансі (ЯМР), це томографія (МРТ), локальна спектроскопія *in vivo* (MRI/MRS) і релаксометрія. Досягнута роздільна здатність методів дорівнює 0,01 - 2 мм в залежності від типу приладів, а чутливість визначення концентрації нейтронозахватних агентів—порядку 1 ppm. Унікальність і важливість ЯМР-методів для НЗТ полягає в тому, що їх застосування не обмежується питаннями біо-

роподілу нейтронозахватних агентів. Методи ЯМР використовуються на всіх етапах розробки і використання НЗТ. MRI/MRS-діагностика може забезпечити не тільки виявлення і контроль розміру пухлин, а й дає змогу отримувати біохімічний профіль вибраної ділянки органу та вимірювати її температуру. Такий унікальний потенціал ЯМР-методи мають завдяки високотехнологічному обладнанню та добре розвинутій теоретичній базі, яка створювалась головним чином для дослідження твердого тіла та рідини. Останні роки спостерігається бурхливий прогрес нанофізики та нанотехнологій. Синтезовані і інтенсивно досліджуються нанорозмірні матеріали медичного призначення, наприклад, такі НЗА, як нанорозмірні ліпосоми, згорнуті полімери або високодисперсний гідроксіалатит, навантажені гадолінієм, який є сильним парамагнетиком. Тому актуальним є створення теорії ядерної магнітної релаксації в дисперсних системах парамагнетиків. Основні параметри ЯМР, це хімічний зсув (місце лінії ЯМР в спектрі), ширина лінії, що зв'язана з часом спін-спінової релаксації  $T_2$ , і час спін-граткової релаксації  $T_1$ . Домінуючим механізмом ядерної магнітної релаксації в системах парамагнетиків є диполь-дипольний(dd).

Ми вперше отримали рівняння, які пов'язують швидкість магнітної dd-релаксації  $V_{1,2} = 1/T_{1,2}$  ядер дисперсійного середовища як функції відстані ядра від сферичних магніторозбавлених дисперсних частинок з молекулярними параметрами дисперсійного середовища, магнітними і геометричними характеристиками магніторозбавлених дисперсних частинок. З'ясувалось наступне. Якщо відстань між поверхнею парамагнітної наночастинки і ядром  $h$  мала порівняно з радіусом наночастинки  $R_p$  швидкість магнітної релаксації спадає як  $h^{-3}$ . Із збільшенням відстані ця залежність переходить у  $h^{-6}$ . Тоді як в класичні рівняння, які описують релаксацію в іонних та молекулярних розчинах парамагнетиків входить тільки мінус шоста ступінь відстані між парамагнетиком і релаксуючим ядром.

## **АНОМАЛІ ПАРОСТКІВ НАСІННЯ ОЧЕРЕТУ ЗВИЧАЙНОГО З ВОДОЙМ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ЗА УМОВ ДОДАТКОВОГО ІОНІЗУВАЛЬНОГО ОПРОМІНЕННЯ**

**А. А. Явнюк<sup>1</sup>, Н. Л. Шевцова<sup>2</sup>, Д. І. Гудков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Національний авіаційний університет, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут гідробіології НАН України, Київ*

Вивчення ефектів хронічного іонізуючого опромінення у вищих рослин забруднених радіонуклідами територіях, зокрема, Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ), є надзвичайно актуальним науковим завданням. Однак численні ефекти можуть не проявлятися при пророщуванні насіння рослин, які зазнають хронічних дозових навантажень. Тому для отримання інформації про приховані фізіологічні порушення у насінневого потомства вищих рос-

лин, а також мінливість радіочутливості насіннєвого потомства використовують додаткове гостре опромінення [1, 2].

У роботі досліджено аномалії паростків насіння очерету звичайного *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud, який є типовим представником прибережних угруповань вищих водяних рослин водойм ЧЗВ, де середня потужність поглиненої батьківськими рослинами очерету дози коливається у межах 1,5 - 15 мкГр/год. Насіннєвий матеріал було піддано додатковому гострому опроміненню в дозах 25, 75 та 150 Гр з метою оцінки зміни його радіостійкості. Аналізували паростки насіння очерету з такими аномаліями: хлорофільні аномалії листя; порушення геотропізму та органогенезу, некрози кореня.

Результати досліджень показали, що у додатково неопроміненого насіннєвого потомства, а також за дози додаткового опромінення у 25 Гр, найбільш чисельною була група аномалій органогенезу порівняно з хлорофільними аномаліями листя та порушеннями геотропізму. У насіннєвого потомства рослин з водойми, де дозове навантаження на батьківські рослини знаходиться на рівні природного радіаційного фону, була виявлена невелика кількість схожих паростків з аномаліями – не більше 30 %. У діапазоні доз додаткового гострого опромінення 25 - 150 Гр максимальна чисельність аномальних паростків схожих зернівок рослин з водойм ЧЗВ становила 60 %, і, як і життєздатність насіння, вірогідно знижувались при збільшенні дози додаткового опромінення.

Виявлено обернений кореляційний зв'язок між життєздатністю та всіма групами аномалій насіннєвого потомства очерету з водойми з природним радіаційним фоном ( $r \geq -0,98$ ). У випадку водойм ЧЗВ такий зв'язок виявлено для більшості груп аномалій ( $r \geq -0,94$ ).

Аналіз появи не сумісних з життям аномалій паростків, а саме некрозів зародкового кореня, показав вірогідне суттєве зростання частки паростків з некрозами коренів за додаткового опромінення у випадку фонових дозових навантажень на батьківські рослини ( $R^2 = 0,86$ ) порівняно з насіннєвим потомством рослин з водойм ЧЗВ ( $R^2 \leq 0,71$ ). Це, ймовірно, пов'язано з тим, що насіннєве потомство рослин, які отримують довготривале опромінення з потужністю дози 15 мкГр/год, є більш радіостійким у порівнянні з насіннєвим потомством рослин, що зростають при природному радіаційному фоні та при довготривалому опроміненні з потужністю 1,5 мкГр/год.

1. Гераськин С.А., Удалова А.А., Дикарева Н.С. и др. Биологические эффекты хронического облучения в популяциях растений // Радиационная биология. Радиоэкология. - 2010. - Т. 50, № 4. - С. 374 - 382.
2. Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др. Современное состояние наземных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа: уровни загрязнения, биологические эффекты. - Екатеринбург: «Гоцинский», 2008. - 204 с.

# РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ $^{137}\text{Cs}$ ПРИ ЗГОРЯННІ ЗРАЗКІВ ЛІСОВОЇ БІОМАСИ

С. І. Азаров<sup>1</sup>, В. Л. Сидоренко<sup>2</sup>, Ю. П. Серета<sup>2</sup>

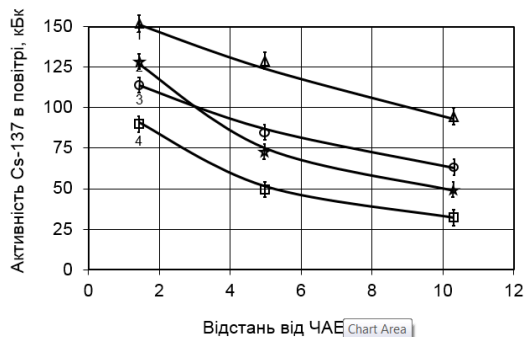
<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

<sup>2</sup> Інститут державного управління у сфері цивільного захисту, Київ

Аналіз та систематизація лісових пожеж у Зоні відчуження з причин виникнення та наслідків їх показали, що найбільш частими є низові і верхові пожежі локального характеру при горінні соснового лісу. Тому в даній роботі лабораторним випробуванням піддали зразки біомаси з соснового лісу у вигляді брикетованого куба з різною кількістю горючого навантаження (лісова підстилка, гілки і хвоя), які спалювалися на піддонах в природних умовах. Проби лісової підстилки відбирали на глибині до 5 см.

Зміна активності  $^{137}\text{Cs}$  в зольному залишку проводили на напівпровідниковому  $\gamma$ -спектрометрі з використанням багатоканального аналізатора з похибкою  $\leq 15\%$ . Максимум розподілу фракції золи за розміром і активності  $^{137}\text{Cs}$  становить  $\sim 70\%$  для лісової підстилки, а для хвої та гілок сосни становить  $>60\%$  і припадає на частки розміром 1–5  $\mu\text{m}$  і це значення зменшується зі збільшенням розміру часток золи. Отримані дані дозволили розрахувати швидкість вільного осадження крупних часток золи розміром  $<20\ \mu\text{m}$  за законом Стокса.

Зразки біомаси, взяті з Зони відчуження, поміщали в високотемпературну піч типу СУОЛ і нагрівали до високих температур. Леткі РПЗ після попереднього охолодження прокачували через фільтри із синтетичної тканини, після чого проводили дисперсійний аналіз осаджених летючих часток методом седиментографічного аналізу. Було отримано, що вихід летких часток РПЗ при згорянні лісової підстилки (при вологості 40%) склав 3,5% за масою, а при горінні гілок і хвої сосни (вологість 15%) –  $\sim 5,7\%$ , що добре узгоджується з даними, наведеними в роботі [1].



Кількість  $^{137}\text{Cs}$ , що виділилася у повітря при повному згоранні 1 кг лісового горючого матеріалу, взятого в районі «Рудого лісу» і біля сіл Лельов і Сахани: 1 – лісна підстилка; 2 – суха трава; 3 – хвоя сосни; 4 – кора сосни.



На рисунку наведено дані про кількість  $^{137}\text{Cs}$ , що виділився у повітря при повному згорянні в печі 1 кг лісового горючого матеріалу взятого в районі «Рудого лісу» і біля сіл Лельов і Сахани.

Встановлено, що максимальну кількість становлять димові частки з аеродинамічними діаметрами в інтервалі (0,5 - 1,0) мкм, при цьому радіус медіан і стандартне відхилення для логнормального розподілу склали  $G_0 = 0,6$  мкм,  $\sigma_0 = 1,2$ , для  $G_0 = 0,8$  мкм  $\sigma_0 = 1,0$ . Інтенсивність осідання  $^{137}\text{Cs}$  становила  $2,3 \cdot 10^{-3}$  Бк/(м·с), а швидкість осідання – 2,6 см/с для лісової підстилки.

1. *25 років* Чорнобильської катастрофи: минуле, сьогодні, майбутнє... // 36. доп. наук.-практ. семінару ІДУЦЗ УЦЗ України та ІЯД НАН України. - К.: 2011. - 93 с.

## **ОПЫТ ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗАХОРОНЕНИЙ РАО ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ**

**М. Д. Бондарьков<sup>1</sup>, В. Н. Глыгало<sup>1</sup>, А. М. Максименко<sup>1</sup>, Б. Я. Осколков<sup>1</sup>,  
В. М. Антропов<sup>2</sup>, В. П. Мельниченко<sup>2</sup>, А. Г. Третяк<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup> Чернобыльский центр по проблемам ядерной безопасности,  
радиоактивных отходов и радиозологии, Славутич  
<sup>2</sup> Центральное Предприятие по обращению  
с радиоактивными отходами, Чернобыль*

Государственной целевой экологической программой обращения с РАО предусмотрено дальнейшее развитие системы обращения с радиоактивными отходами, которые образовались вследствие Чернобыльской катастрофы.

В составе мероприятий по решению этой задачи предусмотрено уточнение данных о количестве и характеристиках РАО в неконтролируемых скоплениях РАО зоны отчуждения, с целью их последующей ликвидации путем захоронения на ПЗРО «Буряковка» и в хранилища комплекса «Вектор».

Важнейший аспект этих исследований – идентификация ядерного топлива, которое может находиться в неконтролируемых скоплениях РАО (бурты, траншеи) зоны отчуждения.

В качестве полигона для опробования различных методов обследования, оценки их эффективности, и отработки методики обследования был выбран пункт захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) «III-я очередь ЧАЭС».

В докладе представлен принятый авторами подход к обследованию захоронений, позволяющий идентифицировать наличие облученного ядерного топлива в составе РАО.

Объем обследований предусматривает применение как неинвазивных методов (поверхностное гамма-сканирование, магнитометрические, георадарные измерения), так и инвазивных методов (бурение скважин с отбором проб, проведение гамма и нейтронного каротажа).

Доклад содержит результаты обследований ПЗРО «III-я очередь ЧАЭС» и ряда буртов ближней зоны ЧАЭС.

# НОВІ СОРБЕНТИ НА ОСНОВІ СПОЛУК ТИТАНУ ДЛЯ ВИЛУЧЕННЯ ІОНІВ СТРОНЦІУ З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

**Г. В. Васильсва<sup>1</sup>, І. Ф. Миронюк<sup>2</sup>, Л. І. Миронюк<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Ужгородський національний університет, Ужгород

<sup>2</sup> Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаніка,  
кафедра органічної та аналітичної хімії, Івано-Франківськ

При поділі  $^{235}\text{U}$  утворюються  $^{88,89,90}\text{Sr}$  з виходами 3,57, 4,79 та 5,77 % відповідно, а також короткоживучі ізотопи стронцію з масовими числами від 91 до 97. Вони можуть попадати в теплоносії ядерних реакторів внаслідок дефектів в оболонці ТВЕЛів. При очищенні теплоносія під час профілактичних робіт, ізотопи стронцію попадають у газоподібні і рідкі відходи АЕС.  $^{90}\text{Sr}$  також утворюється при випробуваннях ядерної зброї. Тому необхідність контролювати вміст ізотопів стронцію у водних розчинах та об'єктах довкілля є актуальною.

Актуальним залишається також пошук матеріалів, які би ефективно поглинали стронції, проявляли при цьому гідролітичну і радіаційну стійкість, а також не порушували баланс у людському організмі чи навколишньому середовищі. Перспективними у цьому плані є сполуки титану.

У даній роботі експериментально досліджувались кінетичні процеси вилучення іонів  $\text{Sr}^{2+}$  із водних розчинів стронцій хлориду, сорбентами на основі сполук титану аморфної та кристалічної модифікації.

До першої групи досліджених сорбентів відноситься аморфний фосфат титану з співвідношенням Р/Ті рівним 1,25 та 1,65. При вивченні радіаційної стійкості фосфату титану було виявлено збільшення поглинання іонів стронцію після хімічної обробки поверхні сорбенту та опромінення гальмівними гамма-квантами, генерованими на бетатроні Б-25,  $E_{\gamma(\text{max})} = 24 \text{ MeV}$ .

## Коефіцієнти сорбції ( $A$ , мг-екв/г) іонів стронцію із водного розчину стронцій хлориду у нейтральному середовищі сорбентами на основі сполук титану

| $C_{(\text{Sr}^{2+})}$ МГ/МЛ | $A$ ,<br>$\text{TiO}_2 / \text{AsO}_4^{3-}$ | $A$ ,<br>$\text{TiO}_2 / \text{PO}_4^{3-}$ | $A$ ,<br>$\text{TiO}_2 / \text{CO}_3^{2-}$ | $A$ , ФТ 1,65 | $A$ , ФТ 1,25 | $A$ ,<br>ФТ + $\text{NH}_4\text{OH}$ | $A$ ,<br>ФТ + $\text{NH}_4\text{OH} + \gamma$ |
|------------------------------|---|--|--|---------------|---------------|--------------------------------------|---|
| 0,891                        | 0,8502                                      | 0,4127                                     | 0,327                                      | 0,04883       | 0,0619        | 0,1523                               | 0,2343  |

Другою експериментально дослідженою групою неорганічних сорбентів були ксерогелі анатазного діоксиду титану, що сформовані з глобул розміром

2 - 4 нм (питома поверхня 280 - 460 м<sup>2</sup> · г<sup>-1</sup>) і містили хемосорбовані аніони AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> або CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Вміст хемосорбованого модифікатора по відношенню до маси TiO<sub>2</sub> становив 4 %. Дослідження сорбції іонів стронцію із водних розчинів проводили з використанням сполук стабільних ізотопів стронцію. Концентрацію елементу визначали методом комплексонометричного титрування. Результати досліджень наведені в таблиці.

Проведені дослідження засвідчують, що найкращі результати щодо сорбції іонів стронцію із водних розчинів демонструє діоксид титану, що містить на своїй поверхні хімічно прищеплені аніони AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Зважаючи на високу хімічну, термічну і гідролітичну стійкість титанооксидного адсорбенту, можна сподіватися, що він знайде використання при вирішенні екологічних проблем сьогодення.

## **МОДЕЛЬ МІГРАЦІЇ <sup>137</sup>Cs В СИСТЕМІ «ГРУНТ – МАКРОМІЦЕТИ» ПІСЛЯ АВАРІЇ НА АЕС**

**В. Д. Виноградська<sup>1</sup>, Н. Є. Зарубіна<sup>2</sup>, Б. С. Прістер<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ*

*<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Розроблено модель міграції <sup>137</sup>Cs з ґрунту в макроміцети за багаторічними даними про забруднення макроміцетів на полігоні «Дитятки» після аварії на Чорнобильській АЕС.

В основу моделі покладено, що величину накопичення радіонукліда макроміцетами визначають процеси:

- розклад лісової підстилки;
- деструкція паливних частинок під дією ґрунтових факторів;
- вертикальна міграція іонів <sup>137</sup>Cs по ґрунтовому профілю за рахунок дифузії та конвективного переносу іонів Cs<sup>+</sup> ґрунтовою вологою;
- процеси необмінної сорбції іонів ґрунтово-поглинаючим комплексом.

Сформовано концептуальну схему моделі, записано систему диференціальних рівнянь та викладено алгоритм чисельного методу розрахунку, який допомагає враховувати неоднорідність ґрунтового середовища. Параметри моделі оцінено методом прогонки з частковим використанням даних, отриманих багатьма дослідниками при вивченні міграційних процесів для лісових, агро- та лучних екосистем.

Встановлено, що параметри міграційних процесів в лісовій підстилці та ґрунті значно відрізняються та залежать від типу лісу та типу ґрунту. Побудовано ряд макроміцетів за здатністю накопичувати <sup>137</sup>Cs, що характеризується екстрапольованим на момент випадіння коефіцієнтом переходу радіонукліда з ґрунту в макроміцети TФ<sub>0</sub>.

Проведено діагностичну перевірку та оцінку якості моделі. Застосування діагностичних критеріїв дозволило зробити висновок, що побудована модель

міграції  $^{137}\text{Cs}$  в ланці «грунт – макроміцети» на полігоні «Дитятки» адекватна в цілому, а визначені для неї параметри значимі в статистичному сенсі. Формальні статистики перевірки якості прогнозу показали, що прогнозований і реальний ряди корелюють між собою. Оцінка чутливості моделі міграції цезію з ґрунту в макроміцети до зміни початкових даних і параметрів підтвердила, що в цілому ця модель є якісною.

Верифікація моделі за даними, отриманими на полігонах «Паришів» та «Лелів», показала, що надійність розрахунків концентрації  $^{137}\text{Cs}$  в макроміцетах по розробленій моделі в межах 50% і може бути визнана задовільною при прогнозуванні радіаційної обстановки. Проведено оцінку можливості використання моделі для прогнозування забруднення  $^{137}\text{Cs}$  макроміцетів на забруднених після аварії на АЕС Фукусіма-1 територіях Японії. Сформульовано вимоги до вхідних даних для забезпечення моделі міграції  $^{137}\text{Cs}$  з ґрунту в макроміцети.

Дослідження виконані за підтримки УНТЦ (Український Науково-Технологічний Центр, США). Проект № 5954.

**ПРИМЕНЕНИЕ ОПЫТА ОРГАНИЗАЦИИ  
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ЗОНЫ АВАРИИ АЭС  
«ФУКУСИМА-1» (ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПРОЕКТ)**

**Д. А. Вишнеvский<sup>1</sup>, Н. Е. Зарубина<sup>2</sup>, О. Л. Зарубин<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup> Государственное специализированное предприятие  
«Чернобыльский спецкомбинат», Чернобыль*

*<sup>2</sup> Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Одна из важнейших характеристик последствий радиационных аварий – длительность воздействия на окружающую среду. Под этим воздействием переход природных экосистем к нормальному состоянию затягивается на годы и десятилетия. Возникает необходимость проводить долговременную политику управления особым типом территории – радиоактивно загрязненными землями. По сравнению с ликвидацией последствий радиационной аварии в пределах локальной промышленной площадки этот процесс намного усложняется. В него необходимо включать большое количество компонентов окружающей среды – ландшафты, экосистемы, подземные и поверхностные воды, приземный слой атмосферы, процессы переноса вещества в различных средах. Все эти процессы необходимо выявить и, образно выражаясь, поместить на экран радара. Эту задачу выполняет радиационно-экологический мониторинг.

В ситуации радиационной аварии функциональное значение лесных экосистем меняется, создается новое проблемное поле: обеспечение радиационной безопасности, стабилизация радиационной обстановки на ранней стадии

аварии; уменьшение потока радионуклидов, оценка экономического ущерба и поиск путей его минимизации на промежуточной и поздней стадии.

В зоне аварии АЭС Фукусима-1 преобладают лесные территории, поэтому возникла необходимость организации радиозоологического мониторинга, ориентированного на условия лесных экосистем. Для разработки системы мониторинга мы взяли за основу принципы организации мониторинга лесов зоны отчуждения ЧАЭС, которые не были реализованы ранее в полном объеме.

Принципиальным компонентом предложенной системы мониторинга является сеть наблюдения, которая, по характеру получаемой информации, делится на два уровня – базовый и специальный. Базовый уровень охватывает всю территорию контроля и представляет собой совокупность точек пробоотбора расположенных в узлах квадратной сети с шагом в 8 км. Отбираются пробы почвы и индикаторные компоненты растительного покрова. Всего предложено 26 таких точек. Данные с базовой сети наблюдения используются для составления общей картины загрязнения.

Специальный уровень сети наблюдения включает в себя площадки, где ведутся наблюдения за процессами, которые определены задачами мониторинга, такими как миграция и накопление радионуклидов отдельными компонентами лесных экосистем. Так же на площадках проходит сбор дополнительной экологической информации. Площадки представляют собой основные ландшафтные условия района ведения мониторинга, поэтому их количество жестко не задается. Существует три оси ландшафтных характеристик, которые мы использовали: тип почвы, тип леса, уровень ландшафта. Таким образом, в зоне аварии АЭС Фукусима-1 мы предлагаем выделить 9 полигонов.

Данная схема радиозоологического мониторинга лесных экосистем достаточно универсальна и может быть использована при изучении радиозоологических последствий потенциальных ядерных аварий на других территориях.

Исследования выполнены при поддержке УНТЦ (Украинский Научно-Технологический Центр, США). Проект № 5954.

## **ОЧИЩЕННЯ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ВІД РАДІОНУКЛІДІВ ПРИРОДНИМИ ТА СИНТЕТИЧНИМИ СОРБЕНТАМИ**

**С. І. Вучкан<sup>1</sup>, В. І. Яковлев<sup>2</sup>, Ю. М. Килівник<sup>2</sup>, Г. В. Васильєва<sup>1</sup>,  
М. Т. Саболчій<sup>1</sup>, І. І. Гайсак<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Ужгородський національний університет,  
кафедра теоретичної фізики, Ужгород*

<sup>2</sup> *Інститут сорбції і проблем ендоекології, Київ*

Досліджено вилучення іонів стронцію із модельного розчину, який містить продукти радіолізу води та іони двовалентного заліза природнім кліноптилолітом, катіонітом універсальним КУ 8.6, фосфатом титану та вугільним сорбентом СКС. Всі сорбенти, крім природного цеоліту були синтезовані в ІСПЕ

НАН України, м. Київ. Застосування модельного розчину мало на меті максимально наблизити умови досліджень очищення водних розчинів до реальних. Приготування модельного розчину відбувалось так: недистильовану воду із природнім вмістом у ній іонів феруму близько 0,025моль/л опромінювали нейтронами з енергією 4 - 10 МеВ ( $\phi = 1,11 \cdot 10^6$  н/с)  $\text{Pu}(\alpha)\text{Be}$  джерела протягом доби. Потім з цією водою готували розчин стабільних ізотопів стронцію і досліджували ефективність поглинання стронцію неорганічними природніми та синтетичними сорбентами. Для порівняння, вилучення іонів стронцію проводили також із розчину дистильованої води. Оскільки у роботі використовувались стабільні сполуки стронцію ( $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), залишкову концентрацію елемента визначали хімічними методами. Методом комплексонометричного титрування також вимірювали вміст іонів феруму у модельному розчині.

Показано, що природній цеоліт найгірше вилучає іони стронцію із водних розчинів. При цьому із модельного розчину, який містить одночасно іони  $\text{Fe}^{2+}$  і  $\text{Sr}^{2+}$ , цеоліт поглине, переважно, іони  $\text{Fe}^{2+}$ .

Інші сорбенти проявляють достатній ступінь вилучення іонів стронцію із водних розчинів. Загалом із модельного розчину сорбція іонів стронцію відбувається трохи гірше, ніж із дистильованої води. Очевидно, відбувається конкуренція між іонами  $\text{Fe}^{2+}$  і  $\text{Sr}^{2+}$ . Виняток становить лише сорбент КУ 8.6. При цьому, відомою перевагою фосфату титану у данному випадку є те, що при поглинанні іонів стронцію на фоні домішкових іонів, даний сорбент нейтралізує продукти радіолізу води [1].

При зовнішньому опроміненні сорбентів високоенергетичними гамма-квантами при дозі 880 Р сорбційні властивості всіх перелічених сорбентів незначно понижуються. При збільшенні дози до 1600 Р тенденція до зниження сорбційних властивостей зберігається, а цеоліт і вугільний сорбент СКС повністю втрачають здатність поглинати іони стронцію.

1. *Васильєва Г.В.* Фізико-хімічні процеси вилучення продуктів ініційованого поділу  $^{235}\text{U}$  із водних розчинів неорганічними сорбентами: Автореф. дис. ... канд. хім. наук. - Івано-Франківськ, 2010.

## **СТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПОРТАЛУ ДЛЯ РЕГІОНАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ЯДЕРНО-КРИМІНАЛІСТИЧНИХ ЛАБОРАТОРІЙ КРАЇН-УЧАСНИЦЬ ГУАМ**

**О. В. Гайдар, В. В. Тришин, Г. П. Гайдар**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Протидія незаконному обігу ядерних та інших радіоактивних матеріалів (ЯРМ) та запобігання використанню їх терористичними угрупованнями є важливою задачею як на національному, так і на міжнародному рівнях.

На сьогодні в ІЯД НАН України створено сучасну ядерно-криміна-

лістичну лабораторію, яка є лідером як в Україні, так і серед країн-учасниць ГУАМ (Грузія, Україна, Азербайджан, Молдова). Завдяки цьому, при створенні регіональної мережі для ядерно-криміналістичних лабораторій країн ГУАМ, вона розглядається в якості регіональної лабораторії.

Для підвищення ефективності спілкування експертів у галузі ядерної криміналістики в ІЯД НАН України розпочато розробку спільного інформаційного порталу регіональної мережі лабораторій. Перш за все, такий портал має надати можливість безпосереднього спілкування в режимі реального часу для авторизованих користувачів – експертів з країн-учасниць ГУАМ. Це дасть змогу значно підвищити ефективність і оперативність розслідувань у випадку виявлення ядерних та інших радіоактивних матеріалів поза межами регулюючого контролю, узгоджувати процедури підготовки зразків для досліджень та обміну їх, методики проведення аналітичних вимірювань, впроваджувати системи гарантування і контролю якості досліджень.

Важливим компонентом порталу також стане база даних, яка має включати різні характеристики ЯРМ та пристроїв на їхній основі, охоплювати різноманітні сфери поводження з ними, національні та міжнародні документи в галузі ядерного регулювання і радіаційної безпеки, інформацію про події, пов'язані з виявленням ЯРМ як у країнах-учасниках мережі, так і в інших державах.

Такі бази даних, як правило, ґрунтуються на традиційних реляційних моделях даних. Розробка ефективної структури бази даних, що включає великий набір пов'язаних між собою окремих таблиць, є досить складною задачею і зазвичай вимагає постійного залучення ІТ-персоналу для її вдосконалення в процесі експлуатації.

У ході створення інформаційної експертної системи для ядерної криміналістики в Україні в ІЯД НАН України було запропоновано нову модель даних. Ґрунтуючись на реляційній моделі і використовуючи всі переваги реляційних систем управління базами даних (СУБД), запропонована модель дає змогу органічну імплементацію основних переваг інших моделей даних, зокрема, ієрархічної, мережної (сутності–взаємовідношення), пост-реляційного сховища документів, тощо. Проведене тестування створеної інформаційної експертної системи показало, що з моменту її започаткування, протягом майже трьох років, запропонована структура цільового шару бази даних (з мінімальною кількістю таблиць) не потребувала і не потребує жодних змін чи доповнень. При цьому відбулося значне збільшення як кількості внесених даних (атрибутивних ознак), так і їхніх типів, класів і груп об'єктів чи сутностей.

Слід зазначити, що запропонований підхід до створення експертної інформаційної системи дає змогу автоматизувати багато рутинних операцій, зокрема, перерахунок фізичних величин з однієї системи одиниць в іншу, спрощує виявлення існуючих зв'язків між об'єктами та встановлення нових. Також він надає можливість використовувати різні операційні системи (Linux, Debian, MS Windows) та комерційні (MS ACCESS, MS SQL) і некомерційні

СУБД (MySQL, MariaDB, PostgreSQL), що значно спрощує адаптацію експертної інформаційної системи до вимог кожного з учасників регіональної мережі ядерно-криміналістичних лабораторій.

## НАКОПИЧЕННЯ СТАБІЛЬНИХ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ГОЛОВНИХ ДОЗООТВОРЮВАЛЬНИХ РАДІОНУКЛІДІВ ВОДНИМИ РОСЛИНАМИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

Х. Д. Ганжа<sup>1</sup>, Д. І. Гудков<sup>1</sup>, Н. Л. Шевцова<sup>1</sup>,  
Л. М. Михальська<sup>2</sup>, В. В. Швартау<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут гідробіології НАН України, Київ

<sup>2</sup> Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, Київ

Одним з важливих чинників, який обумовлює накопичення радіонуклідів живими організмами, є особливості складу їхнього іону. У зв'язку з цим вивчення вмісту стабільних хімічних елементів, які є аналогами головних дозуювальних радіонуклідів, дає змогу з'ясувати видову специфічність накопичення радіоактивних речовин біотою, що є визначальним фактором при формуванні поглинутої дози йонізуючого опромінення.

Досліджували накопичення стабільних та радіоактивних хімічних елементів представниками водної рослинності Чорнобильської зони відчуження. Проби рослин відбирали впродовж вегетаційного періоду 2013 і 2014 рр. в літоралі однієї з найбільш забрудненої радіонуклідами водойми Чорнобильської зони відчуження – оз. Глибоке, що розташоване на відстані 7 км від ЧАЕС. Аналізували рослини, які є типовими представниками фітоценозів заплавної водойми українського Полісся. Елементний склад аналізували на ICP-MS «Agilent» 7700x після озолення зразків в ICP-grade азотній кислоті на мікрохвильовій пробопідготовці Milestone Start D. Питому активність <sup>90</sup>Sr та <sup>137</sup>Cs в рослинах визначали радіохімічним та гама-спектрометричним методами.

Значення питомої активності <sup>90</sup>Sr (1 - 6 кБк/кг) у досліджуваних представників групи гелофіти розподілилися по мірі зниження наступним чином: *Typha angustifolia* → *Carex acuta* → *Glyceria maxima*. Питома активність <sup>90</sup>Sr в групі плейстофітів вірогідно не відрізнялася (близько 1,5 кБк/кг). Максимальні значення питомої активності серед неукорінених гідатофітів виявилися у *Ceratophyllum demersum* (5 - 10 кБк/кг). Накопичення <sup>90</sup>Sr *Cladophora glomerata* відповідає середнім значенням питомої активності серед досліджуваних видів рослин (5 кБк/кг). Дослідження <sup>137</sup>Cs показало, що питома активність для представників групи гелофітів (3 - 17 кБк/кг) знижувалася наступним чином: *C. acuta* → *G. maxima* → *T. angustifolia*. У плейстофітів максимальне значення питомої активності належить укоріненим видам (2–3 кБк/кг). Максимальне накопичення <sup>137</sup>Cs для неукорінених гідатофітів виявилось у *Stratiotes aloides* (6 кБк/кг), а рівень накопичення радіонукліда *C. demersum* не перевищував 5 кБк/кг. Значення питомої активності радіонукліда у



*C. glomerata* переважало таку для більшості досліджуваних видів – 8 кБк/кг.

Для стабільних хімічних елементів у досліджених рослинах зафіксовано найбільший вміст Na, Mg, Al, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Co, Mo і Ba. Накопичення елементів *G. maxima* та *T. angustifolia* знижувалося у ряду  $K^+ > Na^+ > Mg^{2+} > Fe^{2+} > Ca^{2+}$  ( $2 \cdot 10^9$ ,  $5 \cdot 10^8$ ,  $2 \cdot 10^8$ ,  $9 \cdot 10^6$ ,  $4 \cdot 10^5$  мкг/кг), *C. acuta* –  $K^+ > Na^+ > Fe^{2+} > Mg^{2+} > Ca^{2+}$  ( $3 \cdot 10^9$ ,  $4 \cdot 10^8$ ,  $2 \cdot 10^8$ ,  $9 \cdot 10^7$ ,  $8 \cdot 10^5$  мкг/кг), *C. demersum* –  $K^+ > Mg^{2+} > Fe^{2+} > Mn^{2+} > Ca^{2+}$  ( $2 \cdot 10^9$ ,  $4 \cdot 10^7$ ,  $3 \cdot 10^7$ ,  $6 \cdot 10^6$ ,  $2 \cdot 10^5$  мкг/кг), *S. aloides* –  $K^+ > Fe^{2+} > Na^+ > Mn^{2+} > Ca^{2+}$  ( $8 \cdot 10^8$ ,  $8 \cdot 10^8$ ,  $6 \cdot 10^7$ ,  $5 \cdot 10^7$ ,  $7 \cdot 10^4$  мкг/кг), *C. glomerata* –  $K^+ > Fe^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$  ( $2 \cdot 10^9$ ,  $3 \cdot 10^8$ ,  $3 \cdot 10^8$ ,  $9 \cdot 10^7$ ,  $2 \cdot 10^5$  мкг/кг), *Nuphar lutea* –  $Fe^{2+} > K^+ > Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$  ( $3 \cdot 10^9$ ,  $1 \cdot 10^9$ ,  $4 \cdot 10^8$ ,  $9 \cdot 10^7$ ,  $2 \cdot 10^5$  мкг/кг), *Nymphaea candida* –  $K^+ > Fe^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > Ca^{2+}$  ( $2 \cdot 10^9$ ,  $1 \cdot 10^9$ ,  $5 \cdot 10^8$ ,  $5 \cdot 10^8$ ,  $3 \cdot 10^5$  мкг/кг). Концентрація  $Ca^{2+}$ , хімічного аналога  $^{90}Sr$  у групі гелофітів розподілилася по-мірі зниження наступним чином: *C. acuta* → *G. maxima* → *T. angustifolia*. Максимальні значення серед досліджуваних представників неукорінених гідатофітів виявилися у *C. demersum*. У групі плейстофітів максимальна концентрація  $Ca^{2+}$  відмічена для *N. candida*, для *C. glomerata* концентрація відповідає середнім значенням серед досліджуваних видів водяних рослин. Дослідження  $K^+$  та  $Na^+$  показало, що концентрація їх для гелофітів знижувалася наступним чином: *C. acuta* → *G. maxima* → *T. angustifolia*. Для представників інших груп рослин концентрація  $K^+$  та  $Na^+$  розподілилася подібно до особливостей накопичення  $^{137}Cs$ . Кореляційний аналіз зв'язків розмірів стандартного відхилення із вмістом у пробах  $^{90}Sr$ ,  $^{137}Cs$ ,  $Ca^{2+}$  і  $K^+$  показав середньої сили зворотний зв'язок.

Аналітичні дослідження на мас-спектрометрі проводили за сприяння проекту INSC Program 2011: Health and Ecological Programmes around the Chernobyl Exclusion Zone.

## РЫБЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ УРОВНИ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ДОЗОВЫЕ НАГРУЗКИ, РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ

Д. И. Гудков<sup>1</sup>, А. Е. Каглян<sup>1</sup>, Н. А. Поморцева<sup>1</sup>, А. Б. Назаров<sup>2</sup>,  
В. В. Шукалевич<sup>1</sup>, М. С. Баландина<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

<sup>2</sup> ГСП «Чернобыльский спецкомбинат», Чернобыль

<sup>3</sup> Биологический факультет,

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

В период 1998 - 2015 гг. изучали видоспецифичность и динамику накопления  $^{90}Sr$  и  $^{137}Cs$  в рыбе водоемов и водотоков Чернобыльской зоны отчуждения (ЧЗО) с различным гидрологическим режимом и уровнем радионуклидного загрязнения. Проанализировано распределение радионуклидов по органам и тканям рыб, исследованы размерно-весовые, возрастные и сезонные

особенности накопления радионуклидов, а также оценена мощность поглощенной дозы от внутренних и внешних источников облучения. Степень проявления хронического радиационного воздействия у представителей ихтиофауны ЧЗО оценивали на основе анализа гематологических, гистологических и морфологических показателей.

Рыбы замкнутых водоемов ЧЗО продолжают характеризоваться высокой удельной активностью  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Наибольшие уровни удельной активности радионуклидов отмечены для рыб водных объектов, расположенных на одамбированной территории левобережной поймы р. Припять (озера Вершина, Глубокое, Далекое, Красненская старица) – 850 - 1800 Бк/кг  $^{137}\text{Cs}$  и 1430 - 81250 Бк/кг  $^{90}\text{Sr}$ . В рыбе водоема-охладителя ЧАЭС содержание  $^{137}\text{Cs}$  регистрировали в диапазоне 820 - 11000, а  $^{90}\text{Sr}$  – 100 - 750 Бк/кг. Удельная активность радионуклидов в рыбе замкнутых водоемов ЧЗО в период исследований во всех случаях превышала ДУ, согласно принятым в Украине нормативам для рыбной продукции – в 3 - 2320 раз по  $^{90}\text{Sr}$  и в 2 - 212 раз по  $^{137}\text{Cs}$ . В рыбе русловых участков р. Припять в пределах ЧЗО за период исследований зарегистрированы единичные случаи превышения ДУ по  $^{137}\text{Cs}$ , преимущественно для хищных видов.

Анализ лейкограмм красноперки, карася и окуня из водоемов ЧЗО показал, что лимфоциты составляют наибольший пул клеток, на долю которых приходится в среднем до 93 % состава всех лейкоцитов, тогда как число моноцитов колеблется в пределах 1,1 - 2,8 %, нейтрофилов – 5,1 - 2,7 %, базофилов – 0,8 - 0,2 %, а клеток типа бласт – 0,5 - 1,0 %. Периферическая кровь рыб замкнутых водоемов ЧЗО характеризуется низкими показателями содержания лимфоцитов и высокими – нейтрофилов, эозинофилов, базофилов, а также наличием пенистых клеток по сравнению с рыбами из озер с фоновыми уровнями радионуклидного загрязнения.

У рыб ЧЗО были зарегистрированы следующие формы деструктивных нарушений эритроцитов: различные типы деформации ядер; пристеночные ядра; вакуолизация цитоплазмы; пикноз; микроциты; шистоциты; лизис; хроматинолиз и некоторые другие. Наибольшее число деформаций эритроцитов отмечено в рыбе оз. Глубокое. Общее количество нарушений клеток для красноперки оз. Глубокое составил 33,3 %, Яновского затона – 16,5 %, в оз. Далекое – 12,6 % и озера с фоновым уровнем радионуклидного загрязнения – 2,9 %. Увеличение частоты нарушений морфологии клетки оценивается как дегенеративные изменения клетки, возникающие в результате негативного воздействия факторов внешней среды на организм рыб. Среди всех исследованных рыб ЧЗО особи без клеточных патологий не обнаружены. У 48 % особей встречены два типа и более нарушений клеток красной крови. Отмечена также высокая вариабельность показателя объема клеток красной крови у рыб из водоемов ЧЗО по сравнению с контрольными водными объектами.

В докладе будут также представлены данные о морфологических нарушениях осевого скелета и гистопатологии внутренних органов рыб ЧЗО.

## ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАЛОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**В. А. Канченко<sup>1</sup>, И. С. Студзинская<sup>2</sup>, Н. Л. Чепур<sup>1</sup>, М. В. Желтоножская<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль*

<sup>2</sup> *Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт», Киев*

<sup>3</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

На начальной фазе аварии существует необходимость оперативного дистанционного измерения и возникшего радиационного фона. Именно для решения таких задач был разработан, изготовлен и экспериментально исследован малогабаритный радиометр автономный навигационный для беспилотных летательных аппаратов.

Проблема дистанционного радиационного контроля с использованием малых БПЛА в свое время и в некоторой степени была решена на АЭС Фукусима-1. Используемые там БПЛА с вертикальным взлетом и посадкой позволяют проводить мониторинг радиационной обстановки внутри объектов АЭС. Однако, малые БПЛА самолетного типа позволяют перемещаться со скоростями 50-70 км/ч, что позволяет достичь приемлемой точности измерения.

Созданный радиометр автономный навигационный обладает следующими характеристиками:

- габариты (длина, ширина, высота) - 240 × 45 × 35 мм.;
- вес – 140 г.;
- напряжение питания - 3,4 ... 5,5 В;
- значения измеряемой МЭД – 0,2 - 500 мкЗв/ч;
- объем информации за 1 ч работы ~ 0,5 МБ.
- время непрерывной работы – до 20 ч.

Радиометр позволяет определять мощность экспозиционной дозы с одновременной регистрацией пространственных координат. Такт съема информации 1 сек. Время измерения можно предварительно устанавливать 3, 5, 10, 20 или 30 с. При определении мощности дозы для сглаживания результатов измерений использована математическая фильтрация методом линейно-взвешенной скользящей средней. Основная особенность радиометра состоит в малых габаритах, энергоемкости и весе (140 г), что позволяет размещать его в малых беспилотных летательных аппаратах при дистанционном контроле радиационной обстановки.

## **$^{137}\text{Cs}$ У КОМПОНЕНТАХ ЕКОСИСТЕМИ ВОДОЙМИ-ОХОЛОДЖУВАЧА ЧАЕС ЧЕРЕЗ 29 РОКІВ ПІСЛЯ АВАРІЇ**

**О. Л. Зарубін, Н. Є. Зарубіна, В. А. Костюк,  
Е. Ю. Котішевська, І. А. Малюк**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

У 2015 р. у багатьох компонентах водойми-охолоджувача ЧАЕС (окрім риб) реєстрували значне підвищення питомої активності  $^{137}\text{Cs}$ .

У досліджених видах риб водойми-охолоджувача ЧАЕС у 2015 р. питома активність  $^{137}\text{Cs}$  становить 700 - 10000 Бк/кг (в межах стандартної похибки) майже не відрізняється від такої у попередні 3 - 5 років. Як і раніше, найбільша питома активність  $^{137}\text{Cs}$  реєструється у риб високих трофічних рівнів (щука, окунь, судак), а найменша – у риб низьких трофічних рівнів, таких, як лящ, плоскирка, плітка.

В той же час, у 2015 р., за виключенням водопериці колосистої, у досліджених видів водної рослинності та молюсків водойми-охолоджувача регулярно реєструються стабільно високі і вищі за 2014 р. рівні питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  (таблиця).

### **Межі питомої активності $^{137}\text{Cs}$ у водній рослинності та молюсках водойми-охолоджувачі ЧАЕС у 2014 - 2015 рр. (Бк/кг сухої маси)**

| Вид                         | Рік                     |                         |                         |                         |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                             | 2014                    |                         | 2015                    |                         |
|                             | $^{137}\text{Cs}$ , min | $^{137}\text{Cs}$ , max | $^{137}\text{Cs}$ , min | $^{137}\text{Cs}$ , max |
| Дрейсена (жива)             | 237                     | 575                     | 349                     | 3303                    |
| Дрейсена (мертві мушлі)     | 182                     | 825                     | 271                     | 9275                    |
| Очерет (відмерлий)          | 126                     | 1593                    | 238                     | 3329                    |
| Очерет (у період вегетації) | 136                     | 9754                    | 2982                    | 35883                   |
| Водопериця колосиста        | 3485                    | 38585                   | 1351                    | 23535                   |

Очевидно, це пов'язане зі зниженням рівня води у водоймі, що сприяє концентруванню радіонуклідів у меншому об'ємі, та проведенням гідроінженерних робіт на її акваторії.

Надалі вочевидь слід очікувати подальшого збільшення рівнів питомого вмісту радіонуклідів в усіх компонентах водойми-охолоджувача ЧАЕС.

## РЕМЕДІАЦІЯ ҐРУНТІВ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ, ЩО ЗАБРУДНЕНІ $^{137}\text{Cs}$

**Н. Є. Зарубіна, О. Л. Зарубін**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Критично розглянуті основні потенційні та існуючі підходи до ремедіації великих ділянок природних лісових екосистем, забруднених  $^{137}\text{Cs}$  в результаті ядерних аварій зони впливу атомних електростанцій ЧАЕС та Фукусіма-1:

- механічне видалення рослинності і верхніх шарів (підстилка, опад, 0 - 5 см) ґрунту;
- розкладання забруднюючих компонентів до безпечних форм;
- трансформація забруднюючих речовин в необхідну (недоступну) форму;
- фітодеградація.;
- фітостабілізація;
- фітоекстракція.

Основні принципи нашого підходу до ремедіації лісових екосистем декларують мінімізацію штучного впливу на сформовану екосистему для досягнення необхідного ефекту підтримки, відновлення (лікування) даної екосистеми.

Якщо лісова екосистема не перебуває у критичному стані, то включаються природні процеси самореабілітації, при яких, як правило, немає необхідності в зовнішньому штучному впливі.

На нашу думку, основним принципом є невтручання або мінімальний вплив на екосистему, за винятком ситуацій, при яких стан екосистеми загрожує життю та здоров'ю людини або існуванню самої екосистеми:

- При небезпечній або критичній ситуації для людини можна застосовувати фітоекстракцію з подальшими роботами по посадці нових дерев і відновленню рослинного покриву. Однак це довгострокові дорогі програми, які можуть виявитися неефективними;

- Найменший негативний вплив на лісову екосистему надає мікоекстракція, тобто збір плодових тіл грибів з подальшою переробкою та утилізацією. Мікоекстракція радіонуклідів, як і багатьох інших поллютантів, при достатній врожайності грибів більш ефективна і менш шкідлива для лісової екосистеми в порівнянні з фітоекстракцією при використанні деревини;

- У лісових екосистемах відбувається природна фітостабілізація, яка регулює горизонтальні і вертикальні потоки мінеральних речовин (до яких відносяться і сполуки радіонуклідів), формування ґрунтів і самої лісової екосистеми Крім того, в лісі при незначних, як природних, так і антропогенних впливах включаються функції самореабілітації.

- При негативних, але не критичних параметрах впливу на лісові екосистеми можлива штучна фітостабілізація, що полягає в штучних посадках або ригенних видів деревних рослин і чагарників.

Це призведе до ефективного вирішення некритичних радіоекологічних проблем при мінімальному впливі на навколишнє середовище.

Дослідження виконані за підтримки УНТЦ (Український Науково-Технологічний Центр, США). Проект № 5954.

## **РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА РАДІАЦІЙНИМ СТАНОМ ВОДОЙМИ-ОХОЛОДЖУВАЧА ЧАЕС ПІД ЧАС ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ВОДИ**

**В. В. Канівець<sup>1</sup>, Г. В. Лаптев<sup>1</sup>, С. М. Обрізан<sup>2</sup>,  
Г. В. Лісовий<sup>1</sup>, Г. А. Деркач<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Український гідрометеорологічний інститут, Київ*

<sup>2</sup> *Державне спеціалізоване підприємство*

*«Чорнобильський спецкомбінат», Чорнобиль*

Осушення водойми-охолоджувача ЧАЕС розпочалося в середині травня 2014 р. В момент зупинення насосної станції (імовірно 15.05.2014) рівень води був на висотній відмітці 110,78 м БС, а 6.12.2015 – 107,16 м БС (дані ЧАЕС). Середній за цей період темп зниження рівня склав 6,2 мм/добу. У липні 2015 р. ВО розділилася на три окремі частини. В листопаді 2015 р. зниження рівня значно уповільнилося і нині становить 1 - 1,5 мм/добу. На початковому етапі осушення темпи щоденних втрат води (інфільтраційні втрати і випаровування) становили 140 - 150 тис. м<sup>3</sup>/добу, нині – не більше 25 тис. м<sup>3</sup>/добу.

Через невелику суму опадів за минулі півтора роки – 640 мм (за кліматичної норми 938 мм) – зниження рівня води проходило за, так званим, «сухим сценарієм» (ІГН НАНУ).

Спостереження на ВО виконують ДСП «Чорнобильський спецкомбінат» та УкрГМІ. ДСП «ЧС» щомісячно визначає активність <sup>137</sup>Cs і <sup>90</sup>Sr в прибережній воді в 4-х пунктах спостережень, які рівномірно розташовано за периметром ВО. УкрГМІ щосезонно зондує водну товщу на 2-х вертикалях, які призначено на глибоководних ділянках в північній і південній частинах ВО, визначаючи фізико-хімічні показники води і відбираючи проби на гідрохімічний і радіонуклідний аналізи з різних горизонтів.

З початку осушення ВО і до кінця 2015 р. температурний режим ВО був звичайним для водойм помірних широт: весняна і осіння гомотермія з перемішуванням усієї водної маси, літня пряма і зимова зворотна стратифікації. В кисневому режимі негативних аномалій не спостерігалось. Мінералізація води та вміст головних іонів у ній коливалися в діапазоні звичайних багаторічних значень.

За даними прибережних спостережень з січня 2015 р. намітилася тенденція зростання активностей <sup>90</sup>Sr та розчиненого <sup>137</sup>Cs у воді. Так, у північній частині ВО активність <sup>90</sup>Sr зросла в 1,5 - 2, що, можливо, обумовлено біль-

шим рівнем забруднення дна цієї частини водойми, а також суттєвим уповільненням внутрішнього водообміну на цій ділянці ВО в 2015 р. через значне зниження рівня води та появу великої кількості обмілин, які перешкоджають вітровому перемішуванню водної маси. Вертикальний розподіл  $^{137}\text{Cs}$  на ділянках малих і середніх глибин (до 5 - 6 м) був рівномірним. На глибоководних ділянках (11 - 12 м), дно яких вкрито товстим шаром високоактивного мулу у вересні-листопаді спостерігалось 1,5-3-кратне зростання концентрацій активності розчиненого  $^{137}\text{Cs}$  від поверхні води до дна, у березні-червні вертикальний розподіл цього радіонукліда у водній товщі був рівномірним. Внутрішньорічний хід концентрацій був звичайним: мінімум (0,3 - 0,6 Бк/л) в холодний період року, максимум (1,5 - 2,0 Бк/л) – улітку.

Вміст завислих наносів у воді становив 1,4 - 7,0 мг/л, питома активність наносів за  $^{137}\text{Cs}$  становила 150 - 450 Бк/г. Максимальні значення мутності – 3,7 - 7,0 мг/л спостерігалися у листопаді. Частка активності  $^{137}\text{Cs}$  на завислих частках змінювалася в діапазоні 15 - 45 % від загальної активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді. Під час подібних досліджень в період 2002 - 2003 рр. вміст зависі у воді був набагато меншим і становив 0,3 - 3,0 мг/л, питома активність наносів за  $^{137}\text{Cs}$  не перевищувала 100 Бк/кг, а частка активності  $^{137}\text{Cs}$  на завислих наносах не перевищувала 15 % від загальної активності. Ймовірно, в процесі зниження рівня води, в 2015 р. змінилися умови зависеутворення і седиментації у ВО. Не виключено, що збільшення мутності води відбувається через надходження у водойму пилюватих часток з оголених ділянок дна. Можливо, ці частки сорбують  $^{137}\text{Cs}$  із водного розчину і поступово виводять його у дно і через це активність  $^{137}\text{Cs}$  у розчині поки що суттєво не зростає.

## **$^{137}\text{Cs}$ У ДОННИХ ВІДКЛАДАХ КИЇВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА**

**В. В. Канівець, Г. А. Деркач, Г. В. Лісовий, Б. С. Соколов**

*Український гідрометеорологічний інститут, Київ*

В 2012 - 2014 рр. фахівцями УкрГМІ було виконано зйомку радіоактивно-го забруднення донних відкладів Київського водосховища. Проби було відібрано на 320 станціях, призначених таким чином, щоб висвітлити усі форми донного рельєфу та охопити весь діапазон зміни щільності радіоактивного забруднення. Побудовано карту-схему забруднення дна  $^{137}\text{Cs}$ . За цією картою розраховано загальну активність  $^{137}\text{Cs}$  у донних відкладах водосховища. За експериментально визначеними парними співвідношеннями  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  оцінено активності  $^{241}\text{Am}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у донних відкладах

До 1994 р. найзабрудненішими були донні відклади верхньої частини Київського водосховища у зоні безпосереднього впливу вод р. Прип'ять. Внаслідок серії високих весняних повеней (1994, 1999, 2005 та 2013 рр.) відбувся розмив високозабруднених мулових відкладів у верхній частині водосховища, перенесення та осідання забруднених часток у середній частині водосхо-

вища. Одночасно відбувалося природне самоочищення мілководних ділянок дна усього водосховища через вимивання часток мулової розмірності зі складу затоплених заплавноїх ґрунтів під дією гідродинамічних факторів. Ці частки поступово стягувалися на глибоководні ділянки, збільшуючи шар мулових відкладів у зонах стабільного мулонакопичення. Нині товщина мулу на таких ділянках становить 20 - 120 см. Шар максимального забруднення, який утворився в 1986 р., переkritий чистішими відкладами. На  $^{137}\text{Cs}$  припадає 83 % усієї штучної (чорнобильської) радіоактивності донних відкладів, 15 % на  $^{90}\text{Sr}$  і близько 2 % на трансуранові нукліди –  $^{241}\text{Am}$  та ізотопи  $\text{Pu}$ . Усього у донних відкладах Київського водосховища міститься:  $^{137}\text{Cs}$  –  $1464 \pm 300$  Кі,  $^{90}\text{Sr}$  –  $270 \pm 100$  Кі,  $^{241}\text{Am}$  –  $23,7 \pm 6,0$  Кі,  $^{238}\text{Pu}$  –  $4 \pm 2$  Кі,  $^{239+240}\text{Pu}$  –  $9 \pm 4$  Кі.

Було виявлено тісний кореляційний зв'язок між щільністю забруднення дна  $^{137}\text{Cs}$  (Кі/км<sup>2</sup>) і абсолютною масою скелету забрудненого шару мулових відкладів (г/см<sup>2</sup>). Це дозволило розрахувати кількість радіоактивно забрудненого мулового матеріалу, який утворився на дні Київського водосховища після аварії на ЧАЕС, а також оцінити загальну кількість мулу, який накопичився у водосховищі за весь час його існування. Вона становить  $53 \pm 15$  млн. т (150 млн м<sup>3</sup>), з яких  $31 \pm 8$  млн. т є радіоактивно забрудненими радіонуклідами чорнобильського походження. Подібні результати було отримано нами незалежним розрахунком балансу твердої речовини в Київському водосховищі. Це дало можливість розрахувати ступінь замулення Київського водосховища, або втрату його повної ємкості за весь час існування. Якщо повна ємкість становить 3,73 км<sup>3</sup> за НІР, то за 47 років водосховище втратило 4 % своєї ємкості. Ця величина перебуває у межах похибки визначення повного об'єму водосховища і означає, що Київське водосховище є слабо замуленим і тому не потребує проведення заходів з відновлення його ємкості.

Аналіз вмісту природних радіонуклідів у піщаних відкладах заплавноїх ділянок дна водосховища показав, що за величиною ефективної сумарної питомої активності ( $A_{\text{ef}}$ ) природних радіонуклідів піщані відклади середньої та нижньої частин Київського водосховища належить до 1-го класу будівельного матеріалу, який відповідно до ДБН В.1.4-1.01-97 можна використовувати для усіх видів будівництва без обмежень;

Виявлено, що концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$ , який присутній в цьому матеріалі, набагато нижчі за граничні значення, які встановлено національними та міжнародними нормативно-правовими документами для прийняття рішень про належність цього матеріалу до РАВ, про звільнення матеріалу відкладів від регулюючого контролю.

Таким чином, за показниками вмісту штучних і природних радіонуклідів піщані відклади заплавноїх ділянок дна Київського водосховища можна використовувати для потреб будівельної індустрії без будь-яких обмежень.



## ДИСТАНЦІЙНИЙ ПРОБОВІДБІР РАДІОАКТИВНОГО АЕРОЗОЛЮ ПРИ АВАРІЯХ НА АЕС ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАДЛЕГКОГО БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАКА

**В. Я. Канченко<sup>1</sup>, О. О. Ключников<sup>1</sup>, М. Л. Чепур<sup>1</sup>, М. В. Желтоножська<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль*

<sup>2</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Дистанційний відбір проб високодисперсного радіоактивного аерозолю в довільних просторових координатах при аваріях на атомних станціях можна виконувати з допомогою фільтроежекційного пристрою, який закріплено спереду на фюзеляжі надлегкого безпілотної літака (Ключников А., Канченко В., Чепур Н. Беспилотный авиационный комплекс радиационной разведки // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - 2012. - Вип. 1(23). - С. 300 - 312).

Літак виконує політ під керуванням автопілоту з передачею навігаційної інформації (висота, швидкість, курс, просторові координати тощо) по радіоканалу борт-Земля. По досягненню заданих просторових координат виконується відбір проб на фільтрувальну тканину з наступним визначенням об'ємної активності. Таким чином визначається активність на відомих широті, довготі та висоті. Це є перший етап. На наступному етапі по відомим співвідношенням розраховують рівень радіаційного забруднення земної поверхні. Для виконання цих розрахунків необхідно знати напрям і швидкість вітру в координатах де виконано відбір проб. Для визначення напрямку і швидкості вітру авторами розроблена достатньо проста методика яка полягає в наступному.

Літак повинен виконувати політ із стабільною повітряною швидкістю  $V_{п}$ , а при відборі проб літак рухається по колу. При цьому телеметрія показує шляхову швидкість літака  $V_{ш}$ . При польоті за вітром будемо мати  $V_{ш\ mzx} = V_{п} + V_{в}$ , де  $V_{в}$  – швидкість вітру. При польоті проти вітру маємо  $V_{ш\ min} = V_{п} - V_{в}$ . В такому випадку швидкість вітру просто визначається як  $V_{в} = (V_{ш\ mzx} - V_{ш\ min})/2$ .

Напрямок вітру визначається по курсу літака в крапках максимальної і мінімальної шляхової швидкості. Нагадаємо, що курс літака це кут між північним напрямком меридіана і напрямком поздовжньої осі літака в горизонтальному польоті, відлічуваний в градусах від напрямку меридіана за годинниковою стрілкою.

Методика експериментально перевірена з позитивними результатами.

## РАДІОЕКОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРИТОРІЇ БІЛАНІВСЬКОГО РОДОВИЩА ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИТІВ

**К. О. Кориченський, Т. В. Лаврова, Г. В. Лаптев, С. В. Тодосієнко**

*Український гідрометеорологічний інститут, Київ*

У роботі представлено результати радіоекологічних досліджень у зоні можливого впливу Біланівського залізорудного кар'єру (Полтавська область, Україна). Основною метою даного дослідження була сучасна оцінка фонових рівнів природної радіоактивності у навколишньому середовищі. При радіоекологічній характеристиці території родовища аналізувались наступні компоненти навколишнього середовища: гірські породи різних геологічних горизонтів, верхній шар ґрунту, підземні води різних водоносних горизонтів, поверхневі води та зразки пилу та аерозолів із приземного шару атмосфери.

Відбір зразків гірських порід проводився з метою охарактеризування всіх породних різновидів залізорудного родовища (осадові породи, рудне тіло та породи кристалічного фундаменту) до глибин від 250 до 300 м з урахуванням даних гамма-каротажних зйомок. В результаті аналізу встановлено, що усі геологічні горизонти родовища містять природні радіонукліди на фоновому рівні. Середній вміст основних природних радіонуклідів рядів розпаду U і Th становить 22 - 25 Бк/кг. Максимальний вміст радіонуклідів із ряду розпаду U не перевищує 100 Бк/кг. Окремі випадки підвищеного вмісту були зареєстровані для  $^{232}\text{Th}$  (до 200 Бк/кг) та  $^{40}\text{K}$  (до 2000 Бк/кг) в глинах харківської світи (P<sub>3</sub>hr) насичених глауконітом. Залізисті кварцити містять навіть менші концентрації: 10 Бк/кг для радіонуклідів ряду розпаду U та 20 Бк/кг – ряду розпаду Th.

Таким чином, у жодному із зразків гірських порід Біланівського родовища не було виявлено перевищення вмісту радіонуклідів природного походження на рівнях, що вимагають віднесення їх до категорії NORM (природні радіоактивні матеріали, що вимагають оцінки безпеки поводження з ними), а саме: 1000 Бк/кг для будь-яких природних радіонуклідів з рядів розпаду U і Th та 10000 Бк/кг для  $^{40}\text{K}$ .

Проби поверхневого шару ґрунту відбиралися на ділянках з непорушеною поверхнею ландшафту в акумулятивних формах рельєфу. В середньому, вміст радіонуклідів в ґрунтах становить 20 - 35 Бк/кг для  $^{238}\text{U}$  та  $^{226}\text{Ra}$ , 25 - 90 Бк/кг для  $^{210}\text{Pb}$ , 21 - 40 Бк/кг для  $^{232}\text{Th}$ , та 370 - 600 Бк/кг для  $^{40}\text{K}$ . Ці показники концентрації не перевищують фонові рівні для даного регіону (Кіровоградська, Дніпропетровська та Полтавська області).

Результати аналізу вмісту радіонуклідів в пробах пилу та аерозолів із приземного шару атмосфери виявлені головним чином:  $^{210}\text{Pb}$  (0,64 - 0,88 мБк/м<sup>3</sup>) та  $^7\text{Be}$  (5,4 - 7,5 мБк/м<sup>3</sup>). Їхні співвідношення та концентрації мають сезонний характер та є типовими для природних радіонуклідів, як в межах території

Біланівського родовища, так і в місті Комсомольськ.

При аналізі зразків вод визначались: рівень сумарної альфа- і бета-активності, вміст ізотопів  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  та  $^{210}\text{Po}$ . Результати розширеного аналізу показали, що підвищені рівні сумарної альфа активності обумовлені вмістом ізотопів U. При цьому показники безпеки (1,0 Бк/л як для  $^{226}\text{Ra}$ , так і для суміші природних ізотопів  $^{238+234}\text{U}$ ), не перевищувалися. Вміст природних радіонуклідів у водах району на даний час не перевищує стандарти якості ЕС та рівні визначені Нормами радіаційної безпеки України.

Результати досліджень доводять, що роботи з розробки Біланівського родовища можуть виконуватися без впровадження регуляторного контролю в питаннях радіаційного захисту згідно з українським законодавством та міжнародною радіоекологічною практикою.

За результатами проведення фонового радіоекологічного обстеження території Біланівського родовища не було виявлено джерел з підвищеним вмістом природних радіонуклідів. Але враховуючи значне занепокоєння територіальної громади стосовно очікуваних ризиків потенційного радіаційного впливу при розробці родовища, в рамках даної роботи розроблено програми моніторингу і перелік заходів контролю.

## **ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ ЗАСОБІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ**

**В. І. Козій<sup>1</sup>, О. В. Гайдар<sup>2</sup>, В. В. Тришин<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup> Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут», Київ*

*<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Протягом останніх років у Центрі екологічних проблем атомної енергетики проводяться роботи щодо створення геоінформаційних систем моніторингу радіаційного стану та оцінки впливу на навколишнє середовище установок, що використовують ядерні та радіаційні технології. Використання сучасних інформаційних та комунікаційних технологій у комбінації з наявним дозиметричним та радіометричним обладнанням дає змогу створювати нові оперативні та добре задокументовані системи збору та обробки інформації.

Так на сьогодні загального поширення набули мобільні комунікаційні прилади, які дають змогу проводити фотозйомку, визначення географічних координат та пересилання (з використанням 3G та 4G технологій) відзнятої геокодованої інформації у реальному часі. Комбінація таких приладів з портативними та переносними дозиметрами дає змогу проводити добре задокументований оперативний моніторинг радіаційного стану, що особливо важливо у випадку аварійних ситуацій для підвищення оперативності прийняття контрзаходів, що зменшує негативний вплив на населення.

Алгоритм роботи системи доволі простий. За допомогою мобільного телефону з ОС Android робиться фото даних дозиметра в режимі збереження тегів географічного розташування та часу зйомки. З використанням стандартного браузера, встановленого на смартфоні клієнта, фото (з метаданими) відправляється на веб-сервер.

На сервері з використанням розробленого програмного забезпечення здійснюється розпізнання EXIF даних фотографії, зберігання файлу із зображенням на диску та запису EXIF даних та місця збереження файлу у базу даних. Це забезпечує зберігання як візуальної, так і цифрової інформації та можливість здійснення вибірок даних за певний період і відображення їх на карті місцевості.

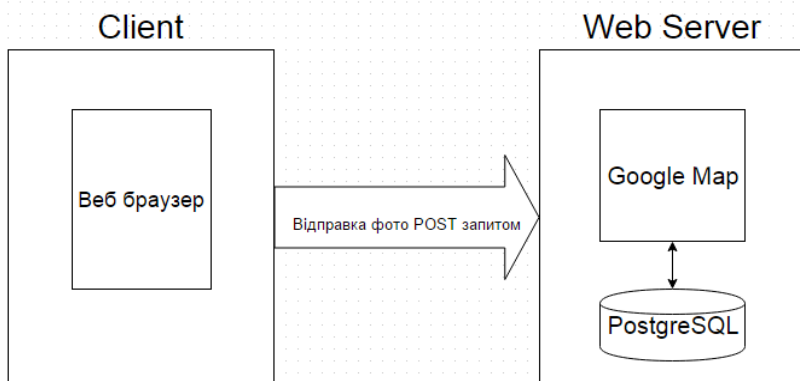


Схема взаємодії між клієнтом та веб-сервером комбінованої геоінформаційної системи радіоекологічного моніторингу.

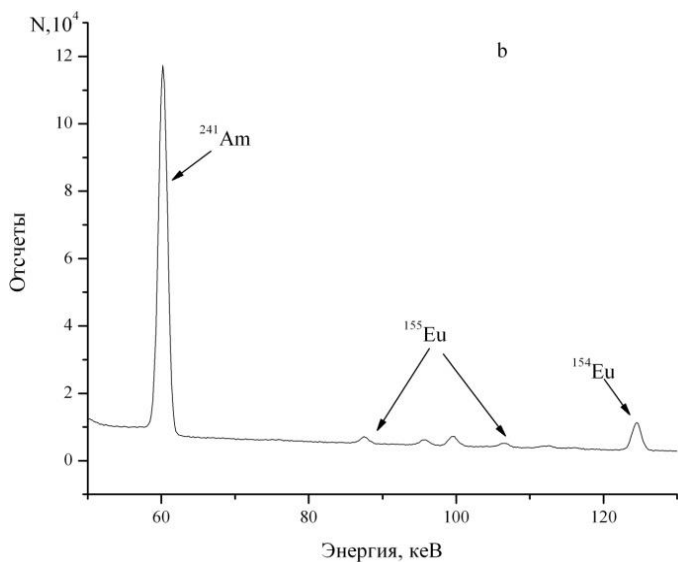
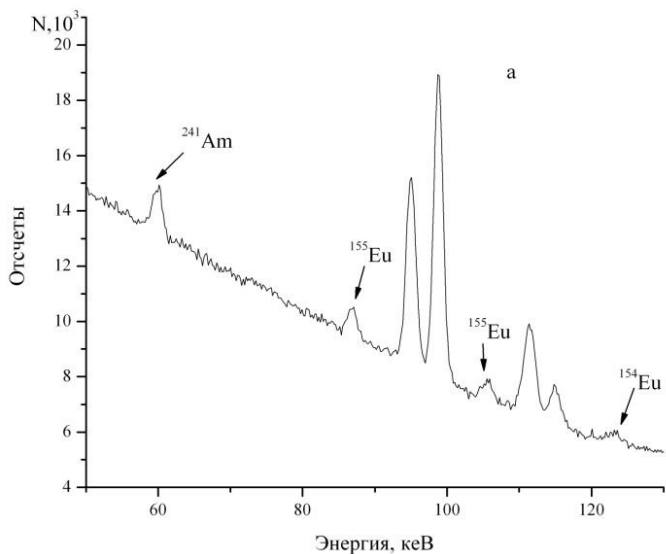
Пілотний проект програмного забезпечення серверної частини розроблено за допомогою технології Java EE, для збереження даних використовується open-source об'єктно-реляційна СУБД PostgreSQL, відображення даних на карті зроблено з використанням Google Maps API. На рисунку представлено схему взаємодії клієнта з веб-сервером. Слід наголосити, що використання open-source технологій не вимагає додаткових витрат на придбання комерційних програмних продуктів.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАММА-РАДИОНУКЛИДОВ В «ГОРЯЧИХ» ЧАСТИЦАХ, ОТОБРАННЫХ В 2012 - 2015 ГГ. В 30-КИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЕ ЧАЭС

**Н. В. Кулич, М. В. Желтоножская, В. И. Николаев, Л. В. Садовников**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

В пробах грунта отобранных в 2012 - 2015 гг. выделены «горячие» частицы и проведены измерения концентрации радионуклидов. Измерения вы-



*a* - спектр частицы с аномально высоким содержанием  $^{155}\text{Eu}$ ;  
*b* - спектр с аномально высоким содержанием  $^{241}\text{Am}$ .

полнены на антикомptonовском спектрометре с Ge- детектором с входным бериллиевым окном. В «горячих» частицах выделены активности  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154,155}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и суммарная активность изотопов Pu. Зная соотношение активностей нуклидов в «горячих» частицах можно определить загрязнение

радионуклидами території 30-кілометрової зони ЧАЭС, т.к. топливна компонента являється основним фактором забруднення. По соотношению изотопов  $^{154,155}\text{Eu}$  определено выгорание  $^{235}\text{U}$  и определено какие ТВЕЛы были источником этих «горячих» частиц. Глубину выгорания частиц можно сопоставить с выгоранием ТВЕЛов реактора. Обнаружены «горячие» частицы с аномально высоким и низким содержанием  $^{241}\text{Am}$ . Выделены «горячие» частицы с соотношением изотопов  $^{154,155}\text{Eu}$  обратным по сравнению с работающими в реакторе.

Проводится обсуждение полученных результатов.

## **ОЦІНКА ПРОЦЕСУ ОСАДОНАКОПИЧЕННЯ У ДНІПРОВСЬКОМУ ВОДОСХОВИЩІ ЗА ДАНИМИ РАДІОМЕТРИЧНОГО ДАТУВАННЯ**

**Т. В. Лаврова, Г. В. Лаптев, О. В. Войцехович, В. В. Канівець,  
Г. А. Деркач, С. Б. Соколов**

*Український гідрометеорологічний інститут, Київ*

У роботі представлено результати аналізу вертикального розподілу радіонуклідів в донних відкладах Дніпровського водосховища, як об'єкта багаторічних досліджень впливу колишнього виробництва з переробки уранової руди (ВО «ПХЗ», м. Дніпродзержинськ) на стан водних екосистем. Територія підприємства розглядається як постійне техногенно-посилене джерело надходження природних радіонуклідів уранового ряду. Більшість радіаційно-небезпечних об'єктів цього підприємства розташовано у заплаві та надзаплавних терасах р. Дніпро (верхня ділянка Дніпровського водосховища) на відстані 1 - 2 км від р. Коноплянки (права притока), що відіграє роль дренажної системи всієї забрудненої території. Тому для оцінки процесів перенесення цих радіонуклідів водним шляхом та їхньої подальшої локалізації відбирались колонки донних відкладів у р. Коноплянка та у Дніпровському водосховищі на різній відстані від її гирла. У якості фонових об'єктів обрано оз. Сомовка, розташоване на лівобережній заплаві навпроти території підприємства. Відібрано 6 колонок у глибоководних місцях з не порушеними донними відкладами довжиною 50 - 80 см під час експедиції на науковому судні УкрГМІ «Г.Готовчиць» в 2009 - 2013 рр. Вміст радіонуклідів визначали гамма-спектрометричним методом із використанням напівпровідникового HPGe детектора GMX40 ORTEC.

Для оцінки хронології формування певних шарів колонок донних відкладів застосовували радіометричний метод з використанням нерівноважного  $^{210}\text{Pb}$ , що дає змогу визначити вік накопичення донних відкладів, утворених протягом останніх 100 - 150 років з точністю до 2 - 10 років. Додатковим маркером виступає  $^{137}\text{Cs}$  (із максимумами 1963 та 1986 рр.). Для аналізу використовували найпоширеніші моделі СІС (constant initial concentration) та СRS (constant rate supply).

За результатами проведених досліджень встановлено, що швидкість накопичення осаду в Дніпровському водосховищі в середньому становить  $0,55 \pm 0,19$  г/см<sup>2</sup>·рік, у гирлі р. Самара -  $0,47 \pm 0,15$  г/см<sup>2</sup>·рік, у верхів'ї р. Коноплянка -  $0,23 \pm 0,09$  г/см<sup>2</sup>·рік, оз. Сомовка -  $0,08 \pm 0,02$  г/(см<sup>2</sup>·рік).

На глибоководних ділянках Дніпровського водосховища на відстані більше 50 км від штучного русла швидкість накопичення урану-238 та радію-226 становить, в середньому:

- у верхніх шарах, що датуються 2012 - 2010 рр. (0 - 7 см) -  $22,2 \pm 7,5$  і  $53,1 \pm 16,4$ ;

- у шарах, що відносяться до періоду останніх 25 років роботи підприємства 1975 - 2000 рр. (33 - 65 см) -  $34,1 \pm 8,5$  і  $44,6 \pm 15,7$ ;

- у шарах, що відносяться до перших 25 років роботи підприємства 1950 - 1975 рр. (69 - 81 см,) -  $22,3 \pm 12,6$  і  $27,0 \pm 12,0$ ;

- у нижніх шарах, що характеризують період до початку роботи підприємства 1936 - 1950 рр. (82 - 85 см) -  $4,7 \pm 2,1$  і  $4,4 \pm 3,1$  мБк/см<sup>2</sup>·рік відповідно.

При цьому за умов аномальних гідрологічних явищ швидкість накопичення їх може у рази перевищувати темпи накопичення їх від техногенно-поосилених джерел надходження.

Таким чином, в сучасних умовах винесення урану і радію у Дніпровське водосховище з проммайданчику колишнього ВО «ПХЗ» на відстань більше 50 км незначне. Під час проведених досліджень не вдалося виявити зон активного перехоплення радіонуклідів в глибоководних улоговинах водосховища, тому слід продовжити детальніші дослідження донних відкладів Дніпровського водосховища із додатковими спостереженнями за вмістом токсичних металів.

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗА ДАНИМИ КАНЦЕР-РЕЄСТРІВ**

**І. М. Лютий**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Внаслідок масового будівництва значної частини будинків з підвищеною радіоактивністю будматеріалів (ПРБМ) вже десятки років на їхніх мешканцях фактично триває масовий експеримент по дослідженню хронічного опромінення малими дозами в наших реальних побутових умовах. Попередні дослідження, проведені в одному з населених пунктів, на підставі даних місцевого онкодиспансера та пошуку будинків з ПРБМ звичайними портативними дозиметрами, підтвердили додаткову онкозахворюваність у будинках з ПРБМ на 30-50% порівняно з контрольними «чистими» будинками. Але при поширенні таких досліджень на всю територію України з урахуванням всіх місцевих особливостей повний пошук будинків з ПРБМ для будь-яких груп дослідників тривав би ще десяток років.

Разом з тим за останні роки в канцер-реєстрах різних рівнів дані про випадки захворювань вже достатньо повно зібрані по всіх будинках України. На базі цих вже зібраних даних з метою спрощення досліджень доцільно сформулювати і досліджувати невеликі, але найбільш інформативні групи будинків з максимальною і мінімальною онкозахворюваністю мешканців. За їхніми адресами можуть бути знайдені як стабільні дози опромінення від будматеріалів та їхній вплив на онкозахворюваність, так і нестабільні дози від радону-222, які в кожному будинку щодня можуть змінюватись і врахувати які значно складніше.

Водночас нерадіаційні чинники теж можуть бути знайдені і враховані.

На жаль, у Національному канцер-реєстрі програми для пошуку випадків захворювань по окремих будинках немає (є лише для вулиць). Отже для розробки такої програми необхідно підключити відповідних фахівців.

## **КОМПЛЕКСНІ РАДІОЕКОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ЧАЕС**

**В. І. Ніколаєв, В. А. Шитюк, А. І Липська, Н. В. Куліч, О. О. Бурдо**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Проведено комплексні радіоекологічні дослідження на найбільш забруднених територіях полігонів ближньої зони ЧАЕС. Комплексні радіоекологічні дослідження включали польові, лабораторні та  $\gamma$ - і  $\beta$ -спектрометричні вимірювання. Об'єктами досліджень були зразки ґрунту, рослинності та мишоподібні гризуни. Відбір зразків проводили на території природних полігонів ближньої зони ЧАЕС в 2015 р., з одночасним дозиметричним обстеженням території. Потужність експозиційної дози  $\gamma$ -випромінювання на різних ділянках різнилась в 3 рази. Характер і величину вертикальної міграції радіонуклідів в ґрунтовому профілі досліджували до глибини 30 см. Спектрометричні дослідження проб ґрунту виявили присутність значної кількості техногенних радіонуклідів:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{60}\text{Co}$ . Питома активність  $^{137}\text{Cs}$  в ґрунтах у верхнього шару змінювалась в діапазоні (35 - 40 кБк/кг), а  $^{90}\text{Sr}$  знаходилась у межах (7 - 10 кБк/кг),  $^{241}\text{Am}$  ( 1 – 1,5 кБк/кг). Співвідношення питомих активностей  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$  в ґрунті було  $3,5 \pm 0,5$ . Щільність радіоактивного забруднення  $^{137}\text{Cs}$  (20 - 25 МБк/м<sup>2</sup>),  $^{90}\text{Sr}$  (6 - 8 МБк/м<sup>2</sup>),  $^{241}\text{Am}$  (0,5 - 0,7 МБк/м<sup>2</sup>). Встановлено, що внаслідок дворічного підтоплення території максимум активності міграційного профілю зміщений у глибину на 2 - 4 см.

Досліджено вміст радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у типових представників рослинності, визначено коефіцієнти переходу (КП) радіонуклідів для різних видів рослин, виявлено видові відмінності. Спостерігали високі значення КП  $^{90}\text{Sr}$  для багаторічних листяних дерев.

Методами  $\gamma$ - і  $\beta$ -спектроскопії досліджено особливості накопичення радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у тілі мишоподібних гризунів, що мешкали на дослід-



ній території. Питома активність в тілі нориць варіювала в широких межах: активність  $^{137}\text{Cs}$  (260 - 1345 кБк/кг), а  $^{90}\text{Sr}$  (550 - 6000 кБк/кг), розраховано поглинені дози внутрішнього опромінення.

## **ВИМІРЮВАННЯ $^{90}\text{Sr}$ У ВОДНИХ ЗРАЗКАХ БЕТА-РАДІОМЕТРОМ ПІСЛЯ ІОН-ОБМІННОГО РОЗДІЛЕННЯ ТА ОСАДЖУВАННЯ**

**Л. С. Пірнач, Т. І. Дивак**

*Український гідрометеорологічний інститут, Київ*

Представлено нову методику визначання  $^{90}\text{Sr}$  у воді, яка дає змогу швидко (2 - 4 дні) отримати результат, без застосування коштовних або рідкісних матеріалів і реактивів. При цьому методика дає змогу визначати хімічний вихід стронцію гравіметричним методом і отримувати вимірювальний препарат у вигляді, що відповідає вимогам вимірювання на установці для радіометрії бета-випромінювання.

Методика базується на поєднанні методу екстракційної хроматографії на катіонобмінній смолі КУ-2-8 та здібності багатьох дво- та трьохвалентних металів утворювати міцні розчинні у воді хелатні сполуки з Трилоном Б ( $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}_8\text{N}_2\text{Na}_2$ , англ.  $\text{Na}_2\text{EDTA}$ ).

Відмінність в стійкості зазначених комплексів дає змогу у різний спосіб проводити розділення елементів. Так,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  та  $\text{Ba}^{2+}$ , на відміну від інших полівалентних металів, не здатні утворювати стійкі комплекси в слабко кислому середовищі (за рН 4 ÷ 5). За цих умов зазначені метали знаходяться у розчині у вигляді катіонів, тому спроможні до адсорбції катіонітом, у той час, як комплекси, утворені іншими елементами, вільно проходять крізь хроматографічну колонку. Повне відділення  $\text{Sr}^{2+}$  від матричного  $\text{Ca}^{2+}$  досягається за рахунок конкуренції в утворенні сульфатів та етилендіамінтетраацетатів в спиртовому середовищі за рН 4,5. При цьому кальцій залишається у стані комплексу, в той час як стронцій осаджується у вигляді нерозчинного в етанолі осаду  $\text{SrSO}_4$ .

Оскільки аналізування проб малої активності вимагає використання проб великих об'ємів (до 10 л), а іонний обмін на хроматографічній колонці обмежується швидкістю пропускання проби через стовпчик катіоніту (близько 10 мл/хв.), ця процедура для проб великих об'ємів вимагає занадто тривалого часу. Для цього випадку в методиці передбачили попереднє концентрування проби шляхом групового осаджування карбонатів лужноземельних елементів.

Для розроблення методики застосували комбінацію аналітичних прийомів збірок [1 - 3], адаптованих для доступних ресурсів лабораторій державної мережі спостережень. Витрати реактивів і матеріалів обчислили для сфери застосування методики при аналізуванні природних вод з показником твердості до категорії «тверда».

Подано результати тестування зазначеної методики на штучних і природ-

них зразках води. Результати аналізування показали задовільний збіг з даними, отриманими за традиційною методикою [1].

1. *Захист* від радіації. Визначання активності стронцію-90 у прісній воді. Метод осаджувань з первинним гідроокисним очищенням та кінцевим вимірюванням по ітрію-90: Методика виконання вимірювань. МВВ 081/12-0666-09.
2. *Визначення* вмісту стронцію – 90 в об’єктах зовнішнього середовища: Методичні вказівки. Методика виконання вимірювань. МНС України, ДСНВП «Екоцентр», Чорнобиль, 2002.
3. *BS ISO 13160* Water quality – measurement of strontium 90 and strontium 89.

## ОСОБЛИВОСТІ ОПРОМІНЕННЯ ПОВІТРЯНО-ВОДЯНИХ РОСЛИН НА РІЗНИХ ГЛИБИНАХ

**С. П. Пришляк, О. М. Волкова, В. В. Беляєв, О. О. Пархоменко**

*Інститут гідробіології НАН України, Київ*

Дослідження впливу іонізуючого випромінювання на водяні рослини ускладнюються рядом проблем, які пов’язані з визначенням поглинутої дози зовнішнього опромінення. Зокрема, повітряно-водяні рослини розміщуються у трьох середовищах – ґрунті, воді та повітрі. Дозою, що формується випромінюванням водних мас та повітря у багатьох випадках можна знехтувати, однак випромінювання донних відкладів суттєво впливає на її величину, і внесок депонованих у донних відкладах радіонуклідів до інтегральної дози змінюється у залежності від умов існування рослин. Мета роботи – визначення закономірностей опромінення повітряно-водяних рослин, які ростуть на різних глибинах.

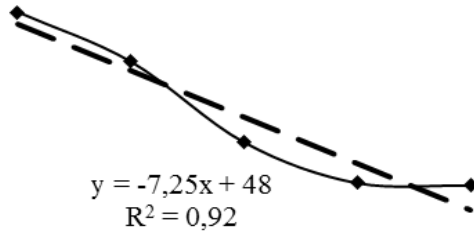
Дослідження виконано у 2013 - 2014 рр. на відкритих мілководдях Київського водосховища на прикладі рогозу вузьколистого та лепешняка великого. Використовували власні дані про вміст  $^{137}\text{Cs}$  в абіотичних компонентах і рослинах та літературні про співвідношення надземної та підземної мас рослин на різних глибинах [1].

Встановлено, що потужність опромінення надземних органів рогозу вузьколистого, що росте на глибині 35 см була у 2,6 разів більшою, ніж рослин, які розвиваються на глибині 35 см, а внесок випромінювання депонованого у донних відкладах  $^{137}\text{Cs}$  до потужності інтегральної дози опромінення його надземної частини зменшувався від 85 до 55 %. Такі самі тенденції були зареєстровані для лепешняка великого.

За умов рівномірного радіонуклідного забруднення піщаного дна мілководь потужність опромінення кореневищ становила 232-252, коренів – 304-397 нГр/доба, тобто була у кілька разів вищою, ніж для надземних органів рослин, і не залежала від глибини їхнього росту.

нГр/доба

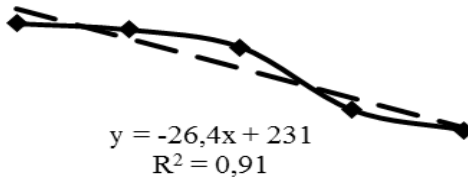
а



Глибина, см

нГр/доба

б



Глибина, см

Потужність інтегральної дози на рогіз вузьколистий:  
*а* – надземні органи, *б* – ціла рослина на різних глибинах  
відкритих мілководь Київського водосховища.

Внесок випромінювання депонованого у донних відкладах  $^{137}\text{Cs}$  до потужності інтегральної дози опромінення цілої рослини для рогузу вузьколистого змінювався від 87 до 79 %. Такі незначні, у порівнянні із градієнтом для надземної частини рослин, зміни внеску пов'язані із збільшенням відносної маси надземних органів рослин на більших глибинах.

1. *Лукина Л.Ф., Смирнова Н.Н.* Физиология высших водных растений. - К.: Наук. думка, 1988. - 188 с.

# МІГРАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ ТА ПОШИРЕНІСТЬ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ/РАДІОНУКЛІДІВ НА ЗАПОВІДНИХ ТЕРИТОРІЯХ ЗАКАРПАТТЯ

Н. Святюк<sup>1</sup>, О. Симканич<sup>2</sup>, В. Маслюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород*

<sup>2</sup> *Ужгородський національний університет, Ужгород*

Представлено результати моніторингу заповідних територій Закарпаття, зокрема, національних природних парків «Синевир», «Ужанський» і «Зачарований край», які розташовані в різних ландшафтних регіонах Закарпаття з певною специфікою умов середовища. Для можливості порівняння міграційних процесів важких металів (ВМ) та їхніх ізотопів у ґрунтах і донних відкладів територій різних ландшафтних зон важливим є визначення параметрів стану цих об'єктів, зокрема типу ґрунту, вміст в ґрунтах і донних відкладах органічних речовин, рН, а також ємності катіонного обміну цих об'єктів, адже ці показники впливають на процеси міграції та акумуляції ВМ. Предметом дослідження був вміст важких металів (Cu, Cd, Pb, Zn, Hg) та радіоізотопів природних рядів урану <sup>238</sup>U, торію <sup>232</sup>Th, а також природного <sup>40</sup>K та техногенного <sup>137</sup>Cs. Вивчалися особливості їхніх міграційних процесів по глибині ґрунтів для різних ландшафтних зон Карпат. Проби ґрунту відбирались за «правилом конверту» на вершинах гір, на схилах і на низинах. За допомогою керну їх очищали від органічних решток, висушували при кімнатній температурі до «повітряно-сухого стану» і просіювали крізь сита. Підготовлені зразки ґрунту, взяті як з поверхні, так і з глибинних горизонтів 20 та 50 см, перед радіологічними дослідженнями поміщали в герметичні контейнери на три тижні для забезпечення умов рівноваги радіонуклідів рядів <sup>238</sup>U та <sup>232</sup>Th.

Отримані дані представлено у вигляді карт поширення ВМ та радіонуклідів для різних заповідних територій Карпат, що мають різний склад ґрунтів. Аналізи засвідчують, що такі ґрунти є різновидами глинистих буроземів, вони мають кислотний характер, а також невеликий вміст органічної речовини, тобто вони є малогумусні. В дослідженнях використовувалися методи атомно-абсорбційної та низькофонової гама- спектроскопії, для зразків ґрунтів/намулів вивчалися також рН та ємність катіонного обміну. Зокрема, значення величин ємності катіонного обміну свідчать про здатність ґрунтів і донних відкладів до накопичення катіонів металів, в т.ч. ВМ. Дослідження показують, що найбільша здатність до акумуляції притаманна ґрунтам і донним відкладам низовинних ландшафтних зон. Ємність катіонного обміну ґрунтів є вищою, ніж донних відкладів малих річок відповідних зон, хоча вміст органічної речовини є більшим у донних відкладах. Обговорюється можливість прогнозування стану природно-заповідних об'єктів показниками поширення ВМ та набору радіонуклідів-міток.

## ОСОБЛИВОСТІ РАДІОНУКЛІДНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ВИЩИХ ВОДЯНИХ РОСЛИН У ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ ЧАЕС

**З. О. Широка, Д. І. Гудков, В. Г. Кленус, О. Є. Каглян**

*Інститут гідробіології НАН України, Київ*

Вивчали радіонуклідне забруднення вищих водяних рослин та його зміни протягом 2007 - 2014 рр. Досліджено 11 видів повітряно-водяних (гелофіти), 8 видів занурених (гідатофіти) та 7 видів рослин із плаваючим на поверхні води листям (плейстофіти). Об'єктами досліджень були обрані типові водойми Зони відчуження – озера Глибоке і Далеке, розташовані на лівобережній заплаві, та оз. Азбучин і Янівський затон – на правобережній заплаві, а також безпосередньо р. Прип'ять в районі м. Чорнобиль.

Дослідження вмісту радіонуклідів у макрофітах водойм Зони відчуження Чорнобильської АЕС показали, що найвищий вміст радіонуклідів був зареєстрований в біомасі рослини з непроточних і слабо проточних водойм. У 2014 р. вміст  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  у макрофітах водойм Зони відчуження лишався на високому рівні: максимальний вміст радіонуклідів у вищих водяних рослинах спостерігався в оз. Глибоке –  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  в межах 117 - 234290 і 690 - 290150 Бк/кг відповідно, а найменший – у р. Прип'ять –  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  в межах 7 - 810 та 6 - 1034 Бк/кг відповідно.

Максимальний вміст  $^{90}\text{Sr}$  зареєстровано в таких видах з оз. Глибоке – стрілолиста стрілолистого (*Sagittaria sagittifolia* L.) (234290 Бк/кг), салвінії плаваючої – *Salvinia natans* (L.) All. (100970 Бк/кг) і жабурника звичайного (*Hydrocharis morsus-ranae* L.) (66830 Бк/кг), а найбільший вміст  $^{137}\text{Cs}$  – у лепехи звичайної (*Acorus calamus* L.) (290150), півників болотних (*Iris pseudacorus* L.) (170300 - 227560 Бк/кг) та осоки гострої (*Carex acuta gracilis* Curt.) (110460 - 136500 Бк/кг). Високими концентраціями  $^{137}\text{Cs}$  характеризувався також – жабурник звичайний (*Hydrocharis morsus-ranae* L.) (98600 - 117580 Бк/кг).

В останні роки у біомасі вищих водяних рослин спостерігається підвищення концентрації  $^{90}\text{Sr}$  в порівнянні з концентрацією  $^{137}\text{Cs}$ , що спричиняє зростання співвідношення  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ . У 2014 р. у досліджених видах рослин з цієї водойми співвідношення  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  перевищувало одиницю – у рогаза вузьколистого (*Typha angustifolia* L.) – 1,5, глечиків жовтих (*Nuphar lutea* (L.) Smith.) – 1,85, їжачої голівки прямої (*Sparganium erectum* L.) – 2,3, куширу зануреного (*Ceratophyllum demersum* L.) – 3,0.

Показано, що в оз. Глибоке помітна тенденція до зниження тренду  $^{137}\text{Cs}$  у макрофітах з одночасним зростанням тренду  $^{90}\text{Sr}$  у них. Тренд вмісту  $^{90}\text{Sr}$  в рослинах оз. Далеке знаходився на одному рівні з незначним зниженням, а тренд  $^{137}\text{Cs}$  з 2008 до 2011 рр. мав тенденцію до поступового зниження, а у 2012 - 2014 рр. лишався на одному рівні. В рослинах озера Азбучин рівні забруднення  $^{137}\text{C}$  зростають, а  $^{90}\text{Sr}$  лишається на одному рівні з тенденцією до незначного зниження. У макрофітах Янівського затону тренд обох радіонуклідів лишається на одному рівні з незначними коливаннями. У рослинах р. Прип'ять відзначено поступове зростання трендів обох радіонуклідів, при поступовому зниженні питомої активності стронцію та цезію.

**Тези доповідей,**  
**що не увійшли до друкованого збірника**

**Тези доповідей з ядерної фізики**

**ПРОВІДНИЙ ЯДЕРНИЙ ЦЕНТР УКРАЇНИ**

**І. М. Вишневський, Н. Л. Дорошко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Доповідь присвячена 45-річчю від дня заснування Інституту ядерних досліджень НАН України. Ідеться про історію створення установи, основні напрямки діяльності, найвагоміші наукові здобутки та про участь Інституту у великих міжнародних проектах і важливих програмах загальнодержавного значення.

1. *Вишневський І.М., Дорошко Н.Л. // Вісник НАН України. - 2015. - № 9. - С. 74.*

**Тези доповідей з радіаційної фізики**  
**та радіаційного матеріалознавства**

**ПРО МОЖЛИВІСТЬ ПРОТОННОЇ НАДПРОВІДНОСТІ**  
**У ОДНОВИМІРНИХ І ДВОВИМІРНИХ ВОДНИХ СИСТЕМАХ**

**Л. С. Марценюк**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Відкриття нових, перспективних високотемпературних надпровідників привело до виникнення ряду проблем з трактуванням їхніх властивостей, що не вписуються в рамки традиційних уявлень. До цих пір не створено єдиної теорії, що пояснює характер явищ у високотемпературних надпровідниках і, фактично, в кожній новій роботі, присвяченій дослідженню властивостей цих матеріалів, пропонуються нові ідеї, які суперечать або істотно доповнюють старі, відсутня єдина точка зору в теоретичних інтерпретаціях.

Особливо це стосується недавно відкритого японськими дослідниками ефекту індукування звичайною водою і спиртовими водними розчинами надпровідності в сполуках  $SrFe_2As_2$  і  $FeTe_{0,8}S_{0,2}$ . До цих пір жодне пояснення цього ефекту не є вичерпним і задовільним.

Самі сполуки в стан надпровідності не переходять. Але при дифузії в них водних молекул, які розташовуються в сполуках одиничними шарами паралельно основним шарам сполук, ці сполуки стають надпровідниками. Властивості води в одновимірних і двовимірних системах аналізуються по аналогії з теорією, створеною з позиції квантової теорії поля для об'ємної води Дж. Препарата. Нами [1] вперше дано трактування ефекту індукування водою надпровідності в шаруватих залізовмісних з'єднаннях  $SrFe_2As_2$  і  $FeTe_{0,8}S_{0,2}$ .

У звичайній воді молекули води з'єднуються між собою водневими зв'язками, що представляють аналог двоямних систем [2]. Згідно загальноприйнятої моделі, протони в таких зв'язках знаходяться в енергетичних мінімумах, розділених квантовими бар'єрами. Якщо до водної системи прикласти зовнішнє поле, в ній виявляється протонна провідність.

Вода, що дифундувала в сполуки  $SrFe_2As_2$  і  $FeTe_{0,8}S_{0,2}$ , є двовимірною системою, і протони молекул води знаходяться в такій системі у збудженому стані. Енергія протонів в такій системі може бути вище за висоту потенційного бар'єра. Це означає, що вода в двовимірних системах може проявити незвичайні властивості. Висловлено припущення, що при переході до стану надпровідності сполук  $SrFe_2As_2$  і  $FeTe_{0,8}S_{0,2}$  (з дифундовоаною в них водою) шари води, що дифундують, виявляють протонну надпровідність, чим і визначається сам ефект індукування водою надпровідності в цих сполуках.

1. *Martseniuk L.S.* About the Mechanism of Arising of the Superconductivity, Induced by Water in Compounds  $SrFe_2As_2$  and  $FeTe_{0,8}S_{0,2}$ . Chapter 2 // Superconductivity: Properties, Applications and New Developments / Ed. Paulette Grant. 2015. Nova Science Publish. USA. Hardcover. ISBN: 978-1-63483-907-5. Pages: 7x10 - (NBC-R).
2. *Антонченко В.Я., Давидов А.С., Іллін В.В.* Основи фізики води. - К.: «Наук. думка», 1991. - 672 с.

## **Тези доповідей з теорії ядерного синтезу та фізики плазми**

### **ГАЛЬМІВНА ЗДАТНІСТЬ ЕЛЕКТРОННОГО ГАЗУ В ЗОВНІШНЬОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ**

**О. В. Хелемеля, Р. І. Холодов**

*Інститут прикладної фізики НАН України, Суми*

В рамках квантово-польового методу проведено аналіз гальмівної здатності електронного газу в зовнішньому магнітному полі. Отримано явний вигляд Лямбда-спецфункції, що відповідає переходу між енергетичними рівнями Ландау в діелектричній сприйнятливості електронного газу в зовнішньо-

Д2

му магнітному полі. Отримано чисельну залежність гальмівної здатності замагніченого електронного газу від швидкості налітаючого іона в наближенні сильних магнітних полів.

1. *Ахизер И.А.* К теории взаимодействия заряженной частицы с плазмой в магнитном поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1961. - Т. 40, вып. 3. - С. 954 - 962.

## **Тези доповідей з радіобіології та радіоекології**

### **ВМІСТ ХЕМОКІНІВ У СІМ'ЯНІЙ РІДИНІ ЗАЛЕЖНО ВІД ОТРИМАНОЇ ДОЗИ ОПРОМІНЕННЯ**

**А. В. Чернишов<sup>1</sup>, Л. В. Стамболі<sup>2</sup>, Б. В. Донської<sup>2</sup>,  
С. М. Канюк<sup>1</sup>, Л. В. Горбань<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України», Київ

<sup>2</sup> ДУ «Інститут педіатрії, акушерства і гінекології НАМН України», Київ

Вивчався вміст хемокінів у сім'яній рідині мешканців України репродуктивного віку, 27 років після аварії на ЧАЕС методом ELISA. Для кожного донору сперми був відомий рівень радіаційної забрудненості тієї місцевості, де він мешкав. Дози забрудненості територій були взяті за даними на 2011 р. і дорівнювали для цих донорів сперми:

Цезій в ґрунті – від 9 до 78 кБк/м<sup>2</sup> (від 0,24 до 0,96 Кі/км<sup>2</sup>).

Цезій у молоці – від 2,1 до 53 Бк/л.

Стронцій у молоці – від 0,25 до 2,3 Бк/л.

Цезій у картоплі – від 1,5 до 6,6 Бк/кг.

Паспортна доза зовнішнього опромінення – від 0,02 до 0,15 мЗв/рік.

Паспортна доза внутрішнього опромінення – від 0,02 до 0,38 мЗв/рік.

Сумарна паспортна доза - від 0,04 до 0,41 мЗв/рік.

Поліморфно-ядерні лейкоцити виявлялись у 72 з 80 (90 %) зразків сперми чоловіків з медіаною  $2 \cdot 10^5$ /мл. У восьми з 80 зразків сім'яної рідини гранулоцитів було  $> 1 \cdot 10^6$  клітин/мл, що згідно ВООЗ (1999), можна було розцінювати як лейкоцитоспермію.

У більшості хворих (n = 74) вміст сперматозоїдів у спермі був в межах норми (19 млн  $\pm$  1 млн кл/мл), у 5 був нижчим норми (10 млн  $\pm$  2 млн кл/мл) і у одного пацієнта був вищим за норму (31 млн кл/мл). Вміст лейкоцитів був у 21 пацієнту 150 тис. – 200 тис. кл/мл, у 29 пацієнтів – 200 тис. - 500 тис. кл/мл, у 12 - 500 тис. - 700 тис. кл/мл, у 10 - 700 тис. – 1 млн. кл/мл, у 8 -  $>1$  млн. кл/мл. Один з хемокінів, інтерлейкін 8 (IL-8), що індукує хемотаксис клітин-мішеней - гранулоцитів, спричиняючи їх міграцію у місця пошкодження та інфекції - прямо корелював з рівнем лейкоцитів в спермі незалежно від радіаційної забрудненості місцевості (p = 0,028, r = 0,2457, n = 80). Але нами була також



встановлена тенденція до кореляції вмісту ІЛ-8 у сім'яній плазмі з рівнем забруднення молока радіоактивним цезієм. З підвищенням рівню забрудненості молока  $Cs_{137}$  вміст ІЛ-8 у спермі зменшувався ( $r = (-0,513)$ ,  $n = 13$ ,  $p = 0,073$ ). Інший хемокін, МСР-1 (моноцитарний хемотаксичний протеїн-1), що рекрутує у місця запалення чи пошкодження моноцити та Т клітини пам'яті, мав тенденцію до кореляції з дозою внутрішнього опромінення ( $p = 0,088$ ,  $r = 0,4903$ ), але не з рівнем лейкоцитів. Тобто з підвищенням дози внутрішнього опромінення зростає рівень МСР-1 у спермі. Але ця доза має декілька складових. Нам вдалося виявити, за рахунок якої саме відбувалися ці зміни. Так, концентрація МСР-1 в сім'яній плазмі прямо корелювала з рівнем  $Sr_{90}$  у молоці у даній місцевості ( $p = 0,0311$ ,  $r = 0,7389$ ). Тобто з підвищенням рівню забрудненості молока  $Sr_{90}$  збільшувалася концентрація МСР-1 у сім'яній плазмі. Також була відмічена пряма кореляція між рівнями концентрації МСР-1 і ІЛ-8 у сім'яній плазмі ( $p < 0,0001$ ) незалежно від території помешкання ( $r = 0,4866$ ,  $n = 80$ ). Концентрація третього хемокіна, MIG (монокін, що індукується гамма-інтерфероном), не змінювалася в залежності ані від дози радіоактивного забруднення місцевості, ані від вмісту лейкоцитів у спермі. Таким чином, були виявлені два хемокіни, вміст яких у сім'яній рідині підпадає впливу радіаційного забруднення місцевості (ІЛ-8, МСР-1) і один (MIG), який не змінюється під цим впливом.

## **ДО ПИТАННЯ ОЦІНЮВАННЯ ФОРМУВАННЯ ДОЗИ ВНУТРІШНЬОГО ОПРОМІНЕННЯ НАСЕЛЕННЯ НА ВІДДАЛЕНОМУ ЕТАПІ ПОДОЛАННЯ НАСЛІДКІВ АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС**

**Г. М. Чоботько, В. П. Ландін, Л. А. Райчук,  
І. К. Швиденко, М. С. Уманський**

*Інститут агроєкології і природокористування НААН, Київ*

Нині проведення протирадіаційних заходів ґрунтується не на закономірностях формування дози опромінення людини, а на тому, що розподіл дози серед мешканців певного населеного пункту співпадає з розподілом забруднення в навколишньому природному середовищі та/або з розподілом питомої активності радіонуклідів у продуктах харчування. Тому всі дослідження зосереджені на моніторингу забруднення сільгоспугідь поблизу населених пунктів, радіоактивності продуктів харчування, тощо. Однак як би коректно не були оцінені ці параметри, неможливо повно розкрити причини формування дози опромінення, без знання яких не можна правильно оцінити або прогнозувати дозу, тим більше планувати протирадіаційні заходи.

В дослідженні дозоутворення в групах однотипної поведінки сільських мешканців узято за основу концепцію А.М. Скрябіна [1], суть якої полягає в тому, що людина або група людей, що має певні особистісні та соціально-

економічні характеристики, взаємодіє з навколишнім середовищем проживання і сприяє формуванню дози, яка є його властивістю.

Аналіз причини формування дози опромінення населення дає доволі чітке уявлення про механізми формування дози внутрішнього опромінення місцевих мешканців. У віддалений період після аварії на ЧАЕС спостерігається диференціація населених пунктів за характером формування дози внутрішнього опромінення. Це можна пояснити соціально-демографічними та еколого-економічними їх особливостями. Очевидними є вплив середнього віку мешканців населеного пункту, рівня їхньої освіти, контакту з лісом, частки робітників певних категорій, соціально-економічне становище, тощо. Все це, в кінцевому рахунку, формує харчову поведінку. Варто зазначити, що дотепер в переважній більшості постраждалих від аварії на Чорнобильській АЕС регіонах спостерігався дещо інший характер розподілу доз внутрішнього опромінення, а саме логарифмічно нормальний.

Радіоекологічний моніторинг мешканців населених пунктів Українського Полісся дає змогу стверджувати, що у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС характер формування дози внутрішнього опромінення дещо змінився. Якщо у попередніх дослідженнях для переважаючої більшості населених пунктів був характерний логарифмічно нормальний закон розподілу, то нині деякі сукупності проявляють ознаки експоненційного і нормального законів. Такий розподіл свідчить про стабілізацію умов, що впливають на формування величини у випадку першого виду розподілу (раціон харчування, рівень радіоактивного забруднення, соціально-економічне становище тощо) і відсутність переважаючих причин (їх зрівноваження) формування сукупності у випадку другого виду розподілу. Виявленою особливістю дозотворення є залежність величини дози внутрішнього опромінення не стільки від рівня поверхневого забруднення території, скільки від місцевих особливостей раціону харчування, а, отже, як від соціально-економічних характеристик регіону/населеного пункту, так і окремої сім'ї. Дані обставини спонукають до необхідності у подальших поглиблених дослідженнях.

1. *Скрябин А.М.* Дозиметрический контроль: техника и методы: материалы междунар. симпоз. «Актуальные проблемы дозиметрии». - Минск: МИРС, 1997. - С. 159 - 160.

## Авторський покажчик

- Абросімов В. І. 19  
Азаров С. І. 92, 97, 99,  
100, 200  
Аксьонов А. В. 112  
Алессіо Ф. 68  
Андрейченко К. С. 184  
Андрейченко С. В. 184,  
189  
Анохін І. Є. 116  
Антропов В. М. 201  
Асламова Л. І. 157  
Атаманюк Н. П. 186  
Бабенко В. А. 86  
Баландина М. С. 209  
Барабаш А. С. 71  
Барановська Л. М. 188  
Барсук С. Я. 42, 56  
Бартишевський В. А.  
136  
Бездробна Л. К. 158  
Безшийко О. 42  
Беллі П. 71, 81, 82  
Беляєв В. В. 226  
Бернабей Р. 71, 81, 82  
Белошенко М. А. 146  
Біган З. М. 61  
Білько Д. І. 159  
Білько Н. М. 159  
Божок О. В. 191  
Бойко Р. В. 159  
Бойко О. А. 179, 186  
Бондар Б. М. 21  
Бондарьков М. Д. 201  
Борецький В. Ф. 132,  
133  
Борисенко В. І. 95, 104,  
107  
Бруданін В. Б. 81  
Буканов В. М. 87  
Бурдін В. В. 65  
Бурдо О. О. 178, 224  
Варніна В. І. 117  
Васильєв Я. В. 71  
Васильєва Г. В. 202,  
205  
Василькевич О. А. 128  
Ватліцова О. С. 184  
Веклич А. М. 132, 133,  
142  
Венедиктов В. М. 160  
Веремейченко Г. М. 44  
Веремій Ю. П. 154  
Верцімаха Г. В. 118,  
119  
Виноградська В. Д. 203  
Вишневський І. М. 45,  
46, 100, 120, Д1  
Вишневский Д. А. 204  
Вієру-Васіліца Т. 127  
Вірко В. Ф. 135  
Вірко Ю. В. 135  
Войтенко Л. М. 152  
Войтер А. П. 55  
Войцехович О. В. 222  
Волкова О. М. 226  
Вучкан С. І. 61, 205  
Гаврилов О. О. 55  
Гаврилюк В. І. 90, 91  
Гаврилюк М. М. 92  
Гаврилюк-Буракова  
А. В. 90  
Гавриш І. Т. 189  
Гайдар Г. П. 130, 206  
Гайдар О. В. 206, 219  
Гайсак І. І. 19, 205  
Гальченко В. В. 88, 89  
Гамазін Д. К. 136, 153  
Ганжа О. Б. 177, 178  
Ганжа Х. Д. 208  
Гапєєнко Д. Д. 162  
Геландер П. 139  
Геник-Березовська  
С. О. 163  
Георгадзе А. Ш. 47  
Главацька В. П. 158  
Главін О. А. 182  
Гладковський В. В. 137  
Глущенко Л. Д. 196  
Гльгало В. Н. 201  
Голіней І. Ю. 119, 121  
Голінка-Безшийко Л.  
42  
Голобородько В. Я. 155  
Голяк М. Г. 93  
Гончаров О. А. 143  
Горанчук В. В. 95  
Горбань Л. В. 189, Д3  
Горбаченко О. М. 21  
Горбаченко А. Н. 51  
Горбунов С. 75  
Горпинич О. К. 69, 70  
Гранцев В. І. 48  
Григоренко О. Д. 49  
Гримало А. К. 50  
Гриневич Ю. П. 165  
Гриньов В. В. 23, 61  
Грицай О. О. 50, 60  
Гриценко А. В. 96  
Гриценко О. В. 87  
Грієрсон Б. 140  
Гродзинський Д. М.  
185  
Гудков Д. І. 198, 208,  
229  
Гудков Д. ІІ. 209  
Гулік В. І. 96, 111  
Гульчук Ю. С. 93  
Гурин А. А. 155  
Давидовська О. І. 19,  
21  
Давидовская О. ІІ. 51  
Давидовский В. В. 25  
Даневич Ф. А. 71, 81,  
82

- Д'Анжело А. 82  
 Д'Анжело С. 71, 81  
 Даниленко І. Ю. 123  
 Даниловська Б. Ю. 23  
 Демехин В. Л. 96  
 Демченко О. М. 166  
 Демчина В. П. 150  
 Денисов В. Ю. 26, 37, 82  
 Деречкей П. С. 61  
 Деркач Г. А. 214, 215, 222  
 Демьохін В. Л. 87  
 Дзюблик О. Я. 27  
 Дибська О. Б. 172  
 Дивак Т. І. 225  
 ді Марко А. 81  
 Дмитрієва І. Р. 186  
 Добіщук В. 80  
 Добровольський А. М. 143  
 Долголенко А. П. 122  
 Донченко Т. С. 138  
 Донської Б. В. ДЗ  
 Дорошко Н. Л. Д1  
 Драпей С. С. 45, 90, 91  
 Древлар М. 139  
 Дрозд І. П. 165, 167, 168, 170, 177, 186, 190  
 Дружина М. О. 182  
 Дряпаченко І. П. 44  
 Дубінін О. В. 55  
 Дулгер Л. Л. 69  
 Євланов В. М. 97, 99, 100  
 Жаба В. І. 19, 28, 69  
 Желтоножська М. В. 217  
 Желтоножская М. В. 192, 211, 220  
 Желтоножський В. О. 46, 50  
 Желтоножский В. А. 45, 51, 192  
 Жернов О. А. 127  
 Заикин Г. Г. 52  
 Зарубін О. Л. 212, 213  
 Зарубин О. Л. 204  
 Зарубіна Н. Є. 203, 212, 213  
 Зарубина Н. Е. 204  
 Заяц Т. М. 83  
 Зелінський А. Г. 123, 127  
 Зотєєв О. Є. 128  
 Зотєєв О. Е. 110  
 Зотєєв В. О. 128  
 Зотєєв В. О. 110  
 Іванова В. С. 188  
 Іванов Ю. С. 160  
 Іванюк Ф. О. 29  
 Ількович В. В. 87  
 Інчікітті А. 71, 81, 82  
 Каглян А. Е. 209  
 Каглян О. Є. 229  
 Каденко І. 42  
 Калустова Д. О. 148  
 Канівець В. В. 214, 215, 222  
 Канченко В. А. 211  
 Канченко В. Я. 217  
 Канюк С. М. ДЗ  
 Капелла Ф. 81, 82  
 Капелла Ф. 71  
 Карачіолло В. 81  
 Караччіоло В. 71  
 Карлишев Ю. Я. 69  
 Касперович Д. В. 69  
 Квашук А. А. 192  
 Килівник Ю. М. 205  
 Кирищук В. І. 53  
 Кисель І. 75  
 Кісурін К. К. 48  
 Кленус В. Г. 229  
 Клепко А. В. 184, 189  
 Клешич М. М. 132, 133  
 Клименко С. В. 163  
 Ключников О. О. 217  
 Кобичев В. В. 71, 82  
 Кобычев В. В. 54  
 Коваленко О. В. 44  
 Ковалінська Т. В. 101, 123, 127, 183  
 Ковальов О. М. 55  
 Ковальчук О. С. 56, 65, 79  
 Козій В. І. 219  
 Козловська І. В. 175  
 Колесник Ю. М. 123  
 Колган В. В. 149  
 Колесниченко Я. І. 139, 140  
 Коломієць М. Ф. 44  
 Колосов А. І. 57  
 Кондратова Ю. А. 189  
 Коновалов С. І. 71  
 Конорева О. В. 130  
 Копилова О. В. 186  
 Корж Р. В. 136  
 Корзина Т. О. 69  
 Кориченський К. О. 218  
 Костюк І. О. 68  
 Костюк В. А. 212  
 Котеленець В. Г. 108  
 Котішевська Е. Ю. 212  
 Кохан А. В. 196  
 Коший С. І. 62, 76  
 Кривохижа М. В. 171  
 Кривський І. Ю. 83  
 Крилов В. 42  
 Кротенко В. В. 128  
 Куліч Є. В. 157  
 Куліч Н. В. 224  
 Кулич Н. В. 220  
 Купряшкін В. Т. 57  
 Курінний Д. А. 172  
 Курочкіна В. А. 158  
 Куртева А. А. 31  
 Кутлахмедов Ю. О. 174  
 Кучмагра О. А. 102

- Кушпій О. А. 44  
 Кьоніс А. 139  
 Лавренчук Г. Й. 162, 175, 179  
 Лаврова Т. В. 218, 222  
 Ландін В. П. Д4  
 Лаптев Г. В. 214, 218, 222  
 Лаубенштейн М. 71, 81  
 Лашко А. П. 58  
 Лашко Т. М. 58  
 Лебідь А. В. 142  
 Левіна О. О. 91  
 Левко Д. С. 138  
 Левченко В. П. 44  
 Лендел В. В. 148  
 Леперк П'єр Луїс Андре 56  
 Лепявко Б. С. 140  
 Лиманець А. О. 60  
 Липська А. І. 165, 167, 168, 170, 177, 178, 186, 188, 224  
 Литвинчук Х. М. 179  
 Литовченко М. В. 125  
 Лібман В. А. 60, 160  
 Лісовий Г. В. 214, 215  
 Літвінов С. В. 180  
 Літовко І. В. 143  
 Луценко В. В. 139, 140  
 Лушкін А. Е. 149  
 Лютий І. М. 223  
 Мазур В. М. 61  
 Маковецька Л. І. 182  
 Максименко А. М. 201  
 Максимов М. В. 103  
 Малий С. В. 125, 130  
 Малишева Т. М. 197  
 Малюк І. А. 212  
 Маргітч Т. О. 26  
 Маринець Т. 34, 36  
 Мартиш С. В. 148, 153  
 Мартиш Е. В. 136, 150  
 Мартишичін В. О. 69  
 Марценюк Л. С. Д1  
 Марченко Л. С. 117  
 Марченко В. С. 144  
 Маслюк В. 34, 36, 73, 127, 228  
 Мегела І. 127  
 Межевич С. Ю. 62, 78  
 Меленевська Н. В. 157  
 Мельник Т. В. 158  
 Мельниченко В. П. 201  
 Миронюк І. Ф. 202  
 Миронюк Л. І. 202  
 Митрохович М. Ф. 63  
 Михайленко В. М. 182  
 Михайлов Л. В. 55, 57, 64, 65  
 Михальська Л. М. 174, 195, 196, 208  
 Михальська С. І. 195  
 Міліція В. М. 56, 65  
 Мінчук Г. Я. 191  
 Мірошніченко Н. С. 157  
 Міхнева Є. Г. 127, 183  
 Мішин А. А. 89  
 Мокіна В. М. 71, 81  
 Момот Є. Л. 66, 79, 80  
 Мотрина О. А. 184  
 Муравинець Л. М. 76  
 Назаров А. Б. 209  
 Назікян Р. 140  
 Найко І. В. 143  
 Найко Л. В. 143  
 Найчук М. В. 168  
 Недибалюк О. А. 145, 150, 153  
 Нестеренко О. Г. 185  
 Нестеренко Т. М. 188  
 Нестеров В. О. 37  
 Ніколаєв В. І. 224  
 Николаєв В. І. 220  
 Обіход Т. В. 38  
 Обрізан С. М. 214  
 Одинокін Г. І. 102  
 Оліх Я. М. 125  
 Ольховський В. С. 39  
 Омельченко С. А. 39  
 Омельчук С. Є. 48  
 Осипенко А. П. 67, 69  
 Осипенко М. М. 67  
 Осколков Б. Я. 201  
 Остапенко І. А. 101, 123, 127  
 Осташко В. В. 44  
 Охріменко О. Ю. 60, 65, 68, 68, 79  
 П'ясецькі Е. 76  
 Павленко Ю. М. 44, 69  
 Павленко В. М. 146  
 Павлович В. М. 47, 103, 111  
 Павлович В. Н. 86  
 Панченко В. Г. 146  
 Парлаг О. М. 34, 36, 69  
 Пархоменко В. В. 91  
 Пархоменко О. О. 226  
 Пастушенко В. І. 168  
 Пельх С. Н. 103  
 Петренко Є. 68  
 Петренко І. В. 125  
 Пілінська М. А. 172  
 Пінковська М. Б. 117, 130  
 Піонтковський Ю. Ф. 104  
 Пірناق Вал. М. 72, 76  
 Пірнач Л. С. 225  
 Піскарьюв А. І. 55  
 Плекан Р. М. 23  
 Плескач О. Я. 186  
 Плюйко В. А. 21, 51, 76  
 Поворозник О. М. 70  
 Пода Д. В. 71, 81, 82  
 Пойда В. Ю. 23  
 Поліщук О. Г. 71, 81, 82  
 Полозов Б. П. 137

- Поморцева Н. А. 209  
Понкратенко О. А. 48, 72, 76, 78  
Поп О. М. 73  
Порицький П. В. 146  
Презадо Й. 79  
Присяжневич І. В. 148  
Пришляк С. П. 226  
Прістер Б. С. 203  
Прохорова Є. М. 177, 186  
Пугач В. М. 56, 65, 66, 68, 68, 74, 79, 80  
Пугач М. В. 75  
Пугач С. М. 87  
Пугач А. М. 96  
Пчеловська С. А. 174  
Пшеничний В. А. 50  
Пшеничний Я. В. 160  
Радіонов С. В. 40  
Райчук Л. А. Д4  
Рашидов Н. М. 171, 180, 185  
Ревка В. М. 105, 109, 113, 114, 120  
Резник С. М. 144  
Рознюк Ю. С. 48  
Роман І. 127  
Романова О. П. 90, 91  
Романюк М. 34, 36  
Руденко Б. А. 48  
Рудчик А. А. 62, 72, 76, 78  
Рудчик А. Т. 62, 72, 76, 78  
Русек К. 62, 76  
Руссу І. З. 159  
Рушковський С. Р. 172  
Рябченко Н. М. 177, 178, 188  
Рязанов В. В. 106  
Саболчій М. Т. 205  
Саврасов А. М. 46, 50  
Саврасов А. Н. 45, 51  
Садовников Л. В. 192, 220  
Садовніков А. С. 102  
Саковська Л. В. 189  
Сакута С. Б. 62, 76  
Салівон А. Г. 174  
Самсоненко А. В. 91  
Сапон М. М. 107  
Сахно В. І. 101, 123, 127, 183  
Сватюк Н. 228  
Сейка І. Ю. 61  
Середа Ю. П. 200  
Сидоренко В. Л. 200  
Сийка І. Ю. 69  
Симканич О. 228  
Скорбун А. Д. 102  
Скорбун А. Д. 108  
Слісенко В. І. 128  
Слободян В. М. 135  
Слюсаренко Л. І. 48  
Сова О. А. 167, 170, 177, 178, 190  
Соколов А. М. 77  
Соколов Б. С. 215  
Соколов С. Б. 222  
Солодовник К. М. 21  
Солодовник Е. Н. 51  
Соломенко Ок. В. 148  
Соломенко Ол. В. 148  
Соломенко Е. В. 149  
Стамболі Л. В. Д3  
Стадник С. М. 102, 108  
Старчик М. І. 117  
Старчик П. Д. 146  
Степаненко Ю. М. 72, 78  
Степанюк А. В. 69  
Стець М. В. 73  
Столяж А. 76  
Сторожик Д. І. 56, 65, 79  
Строек І. 76  
Стружко Б. Г. 48  
Студзинская И. С. 211  
Сугаков В. Й. 129  
Талан О. О. 166  
Талько В. В. 186  
Тарасенко Л. В. 158  
Тарасьєва Н. М. 158  
Тартачник В. П. 125, 130  
Теклішин М. А. 66, 80  
Телецька С. В. 165  
Тищенко М. Г. 156  
Тищенко О. М. 195  
Тітов М. 42  
Ткач О. М. 21  
Тодосієнко С. В. 218  
Толстий М. Ю. 153  
Томилко В. В. 129  
Тонкаль Л. В. 174  
Третяк В. І. 49, 71, 81, 82  
Третяк А. Г. 201  
Тригубенко О. В. 109  
Тришин В. В. 191, 197, 206, 219  
Трофіменко О. В. 184  
Трціньська А. 76  
Тугай А. В. 192  
Тугай Т. И. 192  
Тупіцина І. А. 81  
Туркін Ю. 139  
Улещенко В. В. 72, 78  
Уманський М. С. Д4  
Уматов В. І. 71  
Устинов А. І. 55  
Файнлейб А. М. 123  
Фаус-Гольф А. 56  
Федірчик І. І. 145, 150  
Федорович О. А. 56, 137, 152, 153  
Федоткин С. Н. 41  
Фесенко С. О. 132, 133  
Фурса А. Д. 25  
Халова Н. В. 123, 127  
Харабет А. Н. 110

- Хейдбрінк В. В. 140  
Хелемеля О. В. Д2  
Хойзер Й. 66, 80  
Холодов Р. І. Д2  
Хоменко О. В. 142  
Хоменков В. П. 45  
Хотяїнцев В. М. 111, 112  
Хотяїнцева О. М. 111  
Циганок Т. В. 158  
Цимбалюк О. М. 138  
Чайковський Ю. В. 109, 113, 114  
Чепур М. Л. 217  
Чепур Н. Л. 211  
Червонна Л. Є. 175  
Черкас К. А. 78  
Чернолуцький Д. Л. 149  
Чернишов А. В. Д3  
Черняк Д. М. 71, 81, 82  
Черняк В. Я. 136, 138, 145, 148, 149, 150, 153, 154  
Черулли Р. 71, 81, 82  
Чирко Л. І. 93, 105, 109, 113, 114, 120  
Чоботько Г. М. Д4  
Чулкин О. А. 110  
Шаповал В. В. 149
- Шаров А. Ф. 44  
Швартау В. В. 174, 195, 196, 208  
Швиденко І. К. Д4  
Шевель В. М. 44  
Шевцова Н. Л. 198, 208  
Шевченко Ю. Б. 160, 175, 197  
Шеметун О. В. 166  
Ширма Ю. О. 72  
Широка З. О. 229  
Шитюк В. А. 224  
Шакапак О. В. 114  
Шкарупа В. М. 163  
Шлегель В. М. 71  
Шматко Г. Г. 117  
Шопф К. 155  
Шпырко С. Г. 83  
Шукалевич В. В. 209  
Щурек А. 62, 76  
Юхименко В. В. 136, 149, 153  
Юхименко К. В. 154  
Явнюк А. А. 198  
Яворський В. О. 155  
Якимов М. А. 149  
Якобссон Р. 68  
Яковенко Ю. В. 140, 156  
Яковлев В. І. 205
- Arita K. 33  
Bartel J. 22  
Blocki J. P. 22  
Bondar B. M. 43  
Gorbachenko O. M. 43  
Gorenstein M. I. 32  
Gorpinchenko D. V. 22  
Grygoriev U. V. 32  
Kadenko I. M. 43  
Koliesnik M. V. 33  
Leshchenko B. Yu. 43  
Magner A. G. 22, 33  
Majernikova E. 124  
Plujko V. A. 32, 43  
Sadovnikov L. V. 194  
Shpyrko S. 124  
Solodovnyk K. M. 43  
Tugay T. I. 194  
Tugay A. V. 194  
Zheltonozhskaya M. V. 194  
Zheltonozhsky V. A. 194

Наукове видання

**XXIII ЩОРІЧНА  
НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ  
ІНСТИТУТУ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
НАН УКРАЇНИ**

(Київ, 01 - 05 лютого 2016 року)

Тези доповідей

Укладач *Дрозд Іван Петрович*

Тези публікуються в авторських редакціях

Комп'ютерна верстка *О. Д. Григоренко*

Підп. до друку 14.01.2016. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 13,7.  
Тираж 200 пр. Зам. № 1.

Інститут ядерних досліджень НАН України,  
просп. Науки, 47, м. Київ, 03680, тел. 525-14-56  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4051 від 18 квітня 2011 р.

Надруковано у ЦСТРІ м. Києва, філія № 7 «КОПІ ЦЕНТР»,  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, тел.: 277-88-93, 277-37-49  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 37096928 від 15 березня 2005 р.



Для нотаток