

**Сумський державний університет**

Малихіна Тетяна Василівна

УДК 621.382: 004.942

**МОДЕЛЮВАННЯ ДЕТЕКТУЮЧИХ СИСТЕМ ПОШУКУ ДЖЕРЕЛ  
ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електроніки і управляючих систем Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Стервоєдов Микола Григорович**,  
Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна,  
завідувач кафедри електроніки і  
управляючих систем

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Лопаткін Юрій Михайлович**,  
Сумський державний університет,  
завідувач кафедри  
загальної та теоретичної фізики;

кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Фролова Тетяна Іванівна**,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
докторант кафедри  
фізичних основ електронної техніки.

Захист відбудеться «27» лютого 2015 року о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус ЕТ, аудиторія 236.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розіслано «26» січня 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



І.В. Чешко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Актуальність пошуку джерел проникаючого випромінювання стала очевидною після Чорнобильської аварії, в результаті якої на значній площі навколо станції було розкидано уламки паливних елементів, знаходження яких було першочерговою задачею в процесі очищення території. В теперішній час у деяких країнах світу існує проблема пошуку місць радіоактивного забруднення техногенного походження, яка стала особливо актуальною після аварії на атомній станції Фукусіма. У зв'язку з розвитком ядерних технологій також важливими є задачі радіаційного моніторингу, для вирішення яких потрібно розроблювати методики й апаратуру прискореного пошуку джерел випромінювання; проводити локалізацію ділянок місцевості, які забруднено радіонуклідами; запроваджувати регулярні обстеження промислових об'єктів. У галузі розробки приладів використання комп'ютерних технологій дозволяє істотно оптимізувати виробничі процеси та економити ресурси, зменшує енерговитрати, витрати людських ресурсів. Зокрема, стає можливим провести модельний експеримент та дослідити властивості приладів, що розроблюються, без застосування коштовного обладнання, витрат матеріалів, без істотних витрат електроенергії, а також без залучення великої кількості персоналу лабораторій. Навіть за наявності унікального устаткування існує проблема обмеженого доступу до деякого обладнання, котра зумовлена шкідливими чи небезпечними умовами експерименту. Лабораторні випробування детекторних блоків, які потрібно проводити при розробці детекторів іонізуючого випромінювання, є прикладом таких небезпечних та шкідливих для здоров'я людини випробувань. Також складно (у порівнянні з використанням моделювання) проводити реальні експерименти, пов'язані з розробкою і калібруванням детекторних блоків приладів, призначених для проведення наукових космічних експериментів і реєстрації випромінювання в умовах космосу. У таких умовах немає можливості провести велику кількість реальних експериментів для калібрування приладів, тому використовується комп'ютерне моделювання. Внаслідок цього, при розробці та удосконаленні приладів для виявлення джерел випромінювання, а також при розробці детекторних блоків супутникових спектрометрів-телескопів, досліджень у галузі радіаційних технологій, ядерної медицини і екологічного моніторингу математичне моделювання є досить актуальним і все частіше використовується.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Напрямок досліджень дисертаційної роботи є частиною робіт, які виконувались в Інституті високих технологій Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Дослідження проводились в рамках проекту № 1578 “Розробка комбінованого телескопу для вимірювань потоків високоенергійних заряджених частинок у навколоремному просторі, та для дозиметричних цілей” (2000–2003 рр.) Українського науково-технологічного центру; спільного проекту кафедри електроніки і управляючих систем ХНУ імені В.Н. Каразіна та лабораторії радіаційної, екологічної і хімічної безпеки військ РХБЗ факультету військової підготовки Національного технічного університету “ХПІ” з розробки переносного приладу для локації джерел  $\gamma$ -випромінювання (2008–2010 рр.); держбюджетної теми №0111U001464 “Нейтронне і  $\gamma$ -випромінювання при сухому зберіганні відпрацьованого ядерного палива” (2011–2012 рр.)

Міністерства освіти і науки України; спільного проекту № 02-08-12 (У35-2012) “Механізми утворення та переносу радіонуклідів у Земній атмосфері” (2012–2013 рр.) Російського фонду фундаментальних досліджень і НАН України.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є створення і дослідження детекторних блоків приладів для реєстрації іонізуючого випромінювання, а також технічних пристроїв для потреб ядерної медицини та екологічного моніторингу. Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити такі **задачі**:

- дослідити процеси, які відбуваються у речовинах детекторних блоків приладів, що розроблюються;
- створити комп’ютерні моделі детекторних блоків приладів для реєстрації іонізуючого випромінювання та пристроїв для дослідження випромінювання;
- провести обчислювальні експерименти з моделями приладів, обробити та інтерпретувати дані натурних випробувань, проаналізувати результати;
- уточнити та вдосконалити досліджені технічні характеристики приладів, що розроблюються.

**Об’єкт дослідження** – фізичні процеси, які виникають при взаємодії іонізуючого випромінювання з матеріалами детекторних блоків приладів.

**Предмет дослідження** – моделі приладів для реєстрації іонізуючого випромінювання, технічні характеристики та фізичні параметри детекторних блоків супутникового спектрометру-телескопу “СТЕП-Ф”, приладу для визначення напрямку на точкове джерело  $\gamma$ -випромінювання, конвертору гальмівного випромінювання.

**Методи дослідження:** методи обчислювального експерименту, що базуються на аналітичних розрахунках та методі Монте-Карло; співставлення теоретично одержаних результатів з експериментальними даними.

**Наукова новизна результатів дисертаційної роботи.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше розроблено модель і досліджено фізичні процеси, які відбуваються при проходженні іонізуючого випромінювання через елементи детекторного блоку супутникового спектрометру-телескопу “СТЕП-Ф” космічного наукового експерименту “КОРОНАС-ФОТОН”, що дозволило на етапі розробки приладу уточнити кутову роздільну здатність приладу, а також визначити діапазони енергій частинок, які реєструються приладом.
2. Вперше запропоновано та досліджено детекторний блок приладу для визначення напрямку на точкове джерело  $\gamma$ -випромінювання. Зокрема, за допомогою розробленої комп’ютерної моделі досліджені фізичні процеси, які відбуваються у речовинах детекторного блоку при проходженні  $\gamma$ -квантів. Оптимізовано розташування чутливих елементів і змінено конструкцію детекторного блоку, що дало можливість на  $18^\circ$  розширити діапазон кутів, для яких визначається напрямок на джерело  $\gamma$ -випромінювання.
3. Вперше проведено співставлення експериментальних даних відношення інтенсивності сигналів у детекторах приладу для визначення напрямку на джерело  $\gamma$ -випромінювання та даних чисельного моделювання, що використовуються у якості альтернативи лабораторним дослідженням електромагнітних процесів, які відбуваються у детекторних блоках приладів при реєстрації  $\gamma$ -квантів з

енергіями до 1 МеВ. Встановлено, що модель, котра базується на експериментальних даних Ліверморської національної лабораторії, для даного класу задач є більш ефективною.

4. Отримані спектральні і кутові характеристики гальмівного випромінювання, яке проходить через набір мішеней для утворення  ${}^7\text{Be}$  у різних речовинах, що вперше дозволило разом з експериментальними даними про активність  ${}^7\text{Be}$  розрахувати переріз фотоутворення  ${}^7\text{Be}$  у речовинах, які входять до складу атмосфери Землі, під впливом  $\gamma$ -квантів високих енергій.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

- Для супутникового спектрометру-телескопу “СТЕП-Ф” космічного експерименту “КОРОНАС-ФОТОН” отримані значення поглинених енергій у кожному з детекторів приладу, розраховані вірогідні значення поглинених енергій для фіксованих значень енергій первинних частинок, що необхідно для оцінювання відгуку детекторів при розробці спектрометру-телескопу. Проведено дослідження генерації вторинних частинок, визначені їх типи, кількість і відносний внесок, що дозволяє оцінити можливі радіаційні пошкодження детекторів під час натурних випробувань та наступної експлуатації приладу в умовах космосу. У результаті комп’ютерного моделювання встановлено діапазон енергій первинних електронів, для яких можливе однозначне визначення напрямку приходу шляхом реєстрації елементами кремнієвих матриць з ідентичними номерами. Отримана методом комп’ютерного моделювання сукупність характеристик приладу дозволила виготовити дослідний екземпляр приладу і провести його натурні випробування, за результатами яких робочий екземпляр приладу, встановлений на космічному апараті експерименту “КОРОНАС-ФОТОН”, успішно відпрацював на орбіті Землі за заданою програмою наукового експерименту.

- На основі дослідження фізичних процесів, які виникають при взаємодії гамма-випромінювання з речовиною, було запропоновано метод для визначення напрямку на точкове джерело гамма-квантів та удосконалено геометричні параметри детекторного блоку приладу ДМДП, що розроблювався для реєстрації  $\gamma$ -квантів з енергією 661,6 кеВ. За рахунок зміщення розташування детекторів відносно центру порожнин у поглиначі був розширений діапазон азимутальних кутів, для яких можливе визначення напрямку на точкове джерело  $\gamma$ -випромінювання, що має практичне значення при розробці нових ефективних приладів для екологічного моніторингу.

- Досліджено характеристики гальмівного і нейтронного випромінювання від пристрою, що включає мішені складної конфігурації. Отримані спектральні і кутові характеристики гальмівного випромінювання і потоку нейтронів від гальмівного конвертора мають практичне значення для виробництва медичних ізотопів та дослідження механізмів фотоутворення ізотопу  ${}^7\text{Be}$  у атмосфері Землі.

Використані методи дослідження і отримані результати можуть бути корисні розробникам приладів для реєстрації випромінювання. Запропоновані методи дослідження фізичних процесів, що відбуваються під дією іонізуючого випромінювання у речовині чутливих елементів приладів і складових частин експериментальних установок, а також створений на їх базі науково-програмний комплекс є ефективним інструментом, який дозволяє обчислювати ослаблення потоків електромагнітного випромінювання, розраховувати елементи захисту та оцінювати можливі

радіаційні пошкодження електронних компонент тощо. Розроблений науково-програмний комплекс дозволяє моделювати та досліджувати широке коло фізичних експериментів, що використовують електромагнітне випромінювання, або експериментів, котрі недоцільно проводити через їх шкідливі й небезпечні для здоров'я людини умови.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, що складають основу дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. Особисто автором підготовлено текст статей [2; 8; 10–14] і тези доповідей [15–20; 22]. Матеріали робіт [1; 3–7; 22] обговорювалися спільно зі співавторами. У роботах [10; 12] автором проведені дослідження в області найбільш ефективних моделей електромагнітних процесів взаємодії  $\gamma$ -випромінювання низьких енергій з речовиною детекторних блоків приладів. У наукових роботах [1; 2; 4–9; 11–20] автором розроблені моделі, створені програми та досліджені фізичні процеси проходження випромінювання крізь речовину детекторних блоків приладів; у роботах [3–7; 21] досліджено фізичні процеси взаємодії випромінювання у складових експериментальних установок, проведена статистична обробка отриманих модельних даних; у роботі [9] – обробка даних лабораторних досліджень; у роботах [11; 13; 16–19; 22] – досліджено моделі приладів та обрано методи для визначення напрямку на джерело випромінювання.

**Апробація результатів дисертації.** Основні та найбільш важливі результати дисертаційної роботи доповідалися на науково-технічних конференціях: “Научная сессия МИФИ–2003”, 27–31 січня 2003 р., Москва; “International Europhysics Conference on High Energy Physics EPS-HEP-2003”, 17–23 липня 2003 р., Аахен, Німеччина, Науково-технічна конференція з міжнародною участю “Компьютерное моделирование в наукоёмких технологиях”, 18–21 травня 2010 р., Харків; IV Міжнародна конференція молодих вчених CSE–2010, 25–27 листопада, 2010 р., Львів; “IX Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям”, 21–25 лютого 2011 р., Харків; Міжнародна наукова конференція “Современные проблемы математики и её приложения в естественных науках”, 17–22 квітня 2011 р., Харків; “4-я Всеукраинская научно-практическая конференция “Информационные процессы и технологии. Информатика–2011”, 25–29 квітня 2011 р., Севастополь; “X Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям”, 27 лютого – 2 березня 2012 р., Харків, “III Міжнародна науково-практична конференція “Комп’ютерні науки для інформаційного суспільства”, 12–13 грудня 2012 р., Луганськ; XXIII Міжнародний семінар з прискорювачів заряджених частинок, 8–14 вересня 2013 р., Алушта; Міжнародна конференція “Тараповські читання-2013”, 29 вересня – 4 жовтня 2013 р., Харків.

**Публікації.** Основні матеріали дисертації відображені у 22 публікаціях, з яких 14 статей: 8 статей у фахових виданнях (з них 5 статей опубліковані у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus), 6 статей додатково відображають наукові результати, а також 8 тез доповідей на наукових конференціях і семінарах.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг становить 165 сторінок, у тому числі 109 сторінок основного тексту, 33 рисунки і 5 таблиць по тексту, а також 15 рисунків і 2 таблиці на окремих сторінках, списку літератури зі 125 найменувань на 15 сторінках, 5 додатків на 19 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** висвітлено актуальність і проблематику дисертаційної роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, мету і задачі дослідження, наведено перелік наукових праць за темою дисертації, вказано зв'язок роботи з науковими програмами. Наведено дані про особистий внесок здобувача. Представлено перелік результатів дисертаційного дослідження, які становлять наукову новизну, зазначено практичне значення здобутих результатів, а також перелік наукових конференцій, на яких відбулася апробація результатів.

**Перший розділ “Прилади і методи детектування випромінювання”** складається з п'яти підрозділів. У *першому підрозділі* першого розділу на підставі аналізу літературних джерел розглянуто системи детектування випромінювання та вказано існуючі проблеми при реєстрації іонізуючого випромінювання. Проведено огляд предметної галузі використання різних типів детекторів. Особливу увагу приділено характеристикам детекторів на основі CdZnTe та вказані їх основні переваги при детектуванні іонізуючого випромінювання. Характеристики CdZnTe детекторів, наприклад, висока рухливість носіїв заряду, досить велика ширина забороненої зони, низька енергія на утворення електронно-діркової пари та ін. дозволяють успішно використовувати їх у лабораторних вимірюваннях та медицині, у космічних дослідженнях, в атомній промисловості та при забезпеченні радіаційного моніторингу. У *другому, третьому і четвертому підрозділі* першого розділу здійснено огляд існуючих аналогів приладів, що розроблюються і досліджуються у роботі, вказано невирішені проблеми під час розробки аналогів приладів. У *п'ятому підрозділі* першого розділу показано, що для створення оптимальних приладів для детектування випромінювання необхідні попередні побудова і дослідження моделей приладів, і на їх основі отримання характеристик приладів, зокрема, діапазону енергій, кутової роздільної здатності тощо, які практично дуже складно отримати шляхом тільки натурних випробувань без використання засобів моделювання. Проведено порівняльний аналіз ефективності роботи різних систем моделювання фізичних процесів, які відбуваються у речовині детекторів під дією випромінювання, для заданих (однакових для всіх систем) вхідних параметрів. Показано, що більшість наявних та доступних систем не забезпечують необхідного поєднання широти енергетичних діапазонів, опису матеріалів та реєстрації повного набору іонізуючих частинок (протони, електрони, альфа-частинки, гамма-кванти, нейтрони).

У **другому розділі “Методика проведення досліджень”** обґрунтовано вибір засобів для дослідження фізичних процесів, які відбуваються у речовині чутливих елементів приладів, що розроблюються, та здійснено верифікацію методики. У *першому підрозділі* розглянуто аналітичні методи моделювання фізичних процесів, які відбуваються у речовині детекторів під впливом іонізуючого випромінювання. За механізмом проходження через речовину фізичні процеси, що відбуваються у речовині складових частин пристроїв, досліджувались взаємозалежно, але частинки можна поділити на три групи: легкі заряджені частинки, важкі заряджені частинки, нейтральні. Заряджена частинка, проходячи через речовину, втрачає свою енергію на збудження та іонізацію атомів речовини. Це призводить до утворення сигналу, що характеризує ефекти, які виникають у результаті її взаємодії з речовиною. Для

моделювання процесів взаємодії заряджених частинок із речовиною розроблені комп'ютерні програми, за допомогою яких розраховані пробіги частинок у речовині та питомі втрати енергії частинок.

При проходженні важкої зарядженої частинки через речовину головним механізмом втрат енергії є іонізаційне гальмування. Кінетична енергія зарядженої частинки витрачається на збудження та іонізацію атомів речовини, через яку вона проходить. Питомі втрати енергії важкої зарядженої частинки на іонізацію обчислювались за формулою:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n_e Z^2 r_e^2 m_e^2}{\beta^2} \left[ \ln \frac{2m_e^2 \beta^2}{\bar{I}} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 - U \right],$$

де  $n_e$  – густина електронів речовини;  $Z$  – заряд частинки в одиницях заряду позитрона;  $r_e \approx 2,818 \cdot 10^{-13}$  см – класичний радіус електрона;  $m_e$  – маса спокою електрона;  $\beta = v/c$ , де  $v$  – швидкість частинки;  $\bar{I} = (13,5 \cdot Z) \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}$  – середній іонізаційний потенціал атомів поглинаючої речовини;  $U$  – поправка при низьких енергіях важкої частинки, яка враховувалась при енергіях менше 10 МеВ у середовищі з атомним номером більше 30. Якщо швидкість частинки порівнянна з орбітальною швидкістю К- і L-електронів, то електрони перестають брати участь у зіткненнях, внаслідок чого значення  $dE/dx$  зменшується. При енергіях  $E \approx 1$  МеВ враховувався ще й ефект захоплення електронів частинками, що повільно рухаються.

При моделюванні проходження електронів через шари речовини враховувались іонізаційні втрати енергії, які обчислювались за формулами Бете-Блоха з поправкою на ефект густини Штернхеймера; радіаційні втрати енергії моделювались за формулами Бете-Гайтлера. Повні втрати енергії  $\Delta E$  електронів у речовині обчислювались як сума іонізаційних і радіаційних втрат енергії:  $\Delta E = \Delta E_{\text{ion}} + \Delta E_{\text{rad}}$ , де  $\Delta E_{\text{ion}}$  – іонізаційні втрати енергії,  $\Delta E_{\text{rad}}$  – радіаційні втрати енергії:

$$\Delta E_{\text{ion}} = \int_{E_{\text{min}}}^{E_0} \left( \frac{dE_{\text{ion}}}{dx} \right) dx, \quad \Delta E_{\text{rad}} = \int_{E_{\text{min}}}^{E_0} \left( \frac{dE_{\text{rad}}}{dx} \right) dx,$$

де  $dE_{\text{ion}}/dx$ ,  $dE_{\text{rad}}/dx$  – питомі іонізаційні та питомі радіаційні втрати енергії, відповідно.

Питомі іонізаційні втрати енергії частинок обчислювались як ймовірні втрати енергії з використанням формул Бете-Блоха розрахунку середніх іонізаційних втрат:

$$-\frac{dE_{\text{ion}}}{dx} = 0,3 \frac{z}{A} \cdot \frac{m_e}{\beta^2} \cdot \left[ \ln \frac{m_e E}{2I^2} + \ln \left( \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \right) - 2(\sqrt{1 - \beta^2} - 1 + \beta^2) \cdot \ln 2 - \delta + \beta_8 \right],$$

де  $z$  – атомний номер речовини або ефективний атомний номер (для хімічних сполук);  $A$  – атомна маса речовини або ефективна атомна маса;  $\delta$  – поправка на ефект густини Штернхеймера;  $\beta_8 = 1 - \beta^2 + (1/8) \cdot (1 - \sqrt{1 - \beta^2})$ ;  $I$  – потенціал іонізації речовини, для речовин із  $z \geq 13$  обчислювалась за формулою  $I = (9,76 + 58,6 z^{-1,19}) \cdot z \cdot 10^{-6}$



або  $I_{\text{ефф}} = \exp(\sum_{j=1}^n k_j z_j \ln(I_j) / \sum_{j=1}^n k_j z_j)$  MeВ, де  $k_j$ ,  $z_j$ ,  $I_j$  – відповідно, кількість атомів, атомний номер, потенціал іонізації  $j$ -го простого елемента у молекулі хімічної сполуки. Питомі втрати енергії на випромінювання обчислювались у роботі згідно формул Бете-Гайтлера, враховувалась ступінь екранування ядра електронами атома:

$$-\frac{dE_{\text{rad}}}{dx} = 4 \cdot \frac{N_A z(z-1)}{A} \cdot \alpha \cdot r_e E (\ln \frac{2E}{m_e} - 1/3); \quad m_e \ll E \ll 137 \cdot m_e \cdot z^{-1/3},$$

без екранування, та у разі повного екранування ядра електронами атома

$$-\frac{dE_{\text{rad}}}{dx} = 4 \cdot \frac{N_A z(z-1)}{A} \cdot \alpha \cdot r_e E (\ln(183 \cdot z^{-1/3}) + 1/18); \quad E \gg 137 \cdot m_e \cdot z^{-1/3}.$$

де  $N_A = 6,22 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число Авогадро,  $\alpha \approx 1/137$  – постійна тонкої структури.

Для первинних електронів важливо було продемонструвати статистичний характер процесів розсіювання, тому у *другому підрозділі* розроблена модель фізичних процесів взаємодії випромінювання з речовиною, яка використовує бібліотеку класів Geant4. Носієм моделі є розроблена нами комп'ютерна програма, яка виконується в ОС Linux. Для моделювання процесів багатократного розсіювання електронів використовувалась модель кутового розподілу Гоудсмита-Саундерсона, просторового розподілу Льюїса. Ці моделі базуються на методі Монте-Карло розрахунку траєкторії і середнього кута розсіювання. Основою моделі є алгоритм для визначення кутового відхилення і корекції довжини шляху та просторового зміщення заряджених частинок після кожного кроку у речовині.

Довжина вільного пробігу  $\lambda_k$  частинки визначалася за формулою

$$\lambda_k = 2\pi n_a \int_{-1}^1 [1 - P_k(\cos \chi)] \frac{d\sigma(\chi)}{d\Omega} d(\cos \chi),$$

де  $d\sigma(\chi)/d\Omega$  є диференційний переріз розсіювання,  $P_k(\cos \chi)$  – поліном Лежандра  $k$ -го ступеню;  $n_a$  – кількість атомів у об'ємі речовини. Середнє значення геометричної довжини шляху  $\langle z \rangle$  визначалось за формулою  $\langle z \rangle = \lambda_1 (1 - e^{-t/\lambda_1})$ , де  $t$  є реальна довжина ділянки шляху; середня величина кута розсіювання  $\theta$  розраховувалась на кінцевій ділянці шляху за формулою  $\langle \cos \theta \rangle = e^{-t/\lambda_1}$ , дисперсія  $\sigma$  величини визначалась за формулою  $\sigma^2 = (1 + 2e^{-2t/\lambda_2})/3 - e^{-2t/\lambda_1}$ .

Моделювання реєстрації незаряджених частинок відбувалось за ефектами, створюваними ними в об'ємі детектора зарядженими вторинними частинками.

Проведено порівняння розрахункових і опублікованих табличних даних пробігів у речовині CsI та Si для первинних електронів, а також у алюмінії для протонів і альфа-частинок. Співставлення результатів проводилось у діапазонах енергій 0,01 – 20 MeВ для електронів, 3 – 150 MeВ для протонів, 10 – 500 MeВ для альфа-частинок.

Також було обчислено питомі іонізаційні втрати енергії заряджених частинок. Розрахункові дані питомих іонізаційних втрат, а також екстрапольованих пробігів електронів, середніх пробігів протонів і альфа-частинок співпадали з табличними даними у досліджуваних діапазонах енергій для зазначених матеріалів, що свідчить про адекватність методів, на яких оснований розрахунок.

З використанням прискорювача іонів Центру нанотехнологій університету Juvaskyla (Фінляндія) нами були проведені експериментальні дослідження процесів зворотного розсіювання іонів гелію з енергією  $E_{\alpha}=2$  MeV. Також було проведено обчислювальні експерименти, які моделюють проведені лабораторні дослідження процесів зворотного розсіювання легких іонів. І в лабораторному, і в обчислювальному експерименті досліджувалась залежність від кута розсіювання відносної кількості зворотно розсіяних іонів. Показано, що результати розрахунків добре узгоджені з експериментальними даними, що також свідчить про адекватність розробленої моделі.

У третьому розділі “Детекторний блок супутникового спектрометру-телескопу “СТЕП-Ф” представлені результати дослідження фізичних процесів, що відбуваються у речовині чутливих елементів детекторного блоку супутникового спектрометру-телескопу “СТЕП-Ф” наукового космічного експерименту “КОРОНАС-ФОТОН”. На основі досліджень, які представлені у розділі 2 роботи, у першому підрозділі третього розділу розроблено математичну модель детекторного блоку приладу “СТЕП-Ф”. Прилад призначений для ідентифікації заряджених частинок радіаційних поясів Землі та визначення їх кутового і просторового розподілу. Блок детекторів (рис. 1), складається з двох ідентичних кремнієвих позиційно-чутливих матричних детекторів D1 і D2 (рис. 2) та двох сцинтиляційних детекторів D3 і D4. На рис. 3 наведено OpenGL-візуалізацію фрагменту моделі блоку детекторів приладу “СТЕП-Ф”.

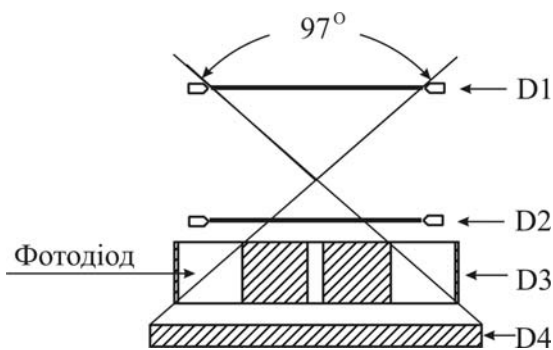


Рис. 1. Схема взаємного розташування детекторів приладу “СТЕП-Ф”: D1, D2 – кремнієві матриці,  $h=0,3$  мм; D3 – CsI(Tl),  $h=13$  мм; D4 – CsI(Tl),  $h=5$  мм

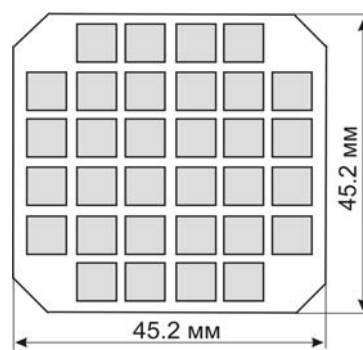


Рис. 2. Схема розташування елементів детекторів D1 і D2

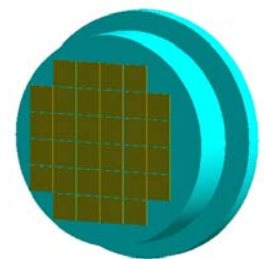


Рис. 3. Візуалізація моделі детекторного блоку

При дослідженні електромагнітних процесів у детекторах приладу враховувались для електронів: іонізаційні, радіаційні втрати енергії та процеси багатократного розсіювання; для протонів і альфа-частинок враховувались іонізаційні втрати енергії та непружне розсіювання, тобто основні процеси, що впливають на енерговиділення, і, відповідно, на амплітуду імпульсів у детекторах. Методом обчислювального експерименту отримані значення поглинених енергій у кожному детекторі приладу,

розраховані найбільш ймовірні значення поглинених енергій для фіксованих значень енергій первинних електронів (рис. 4).

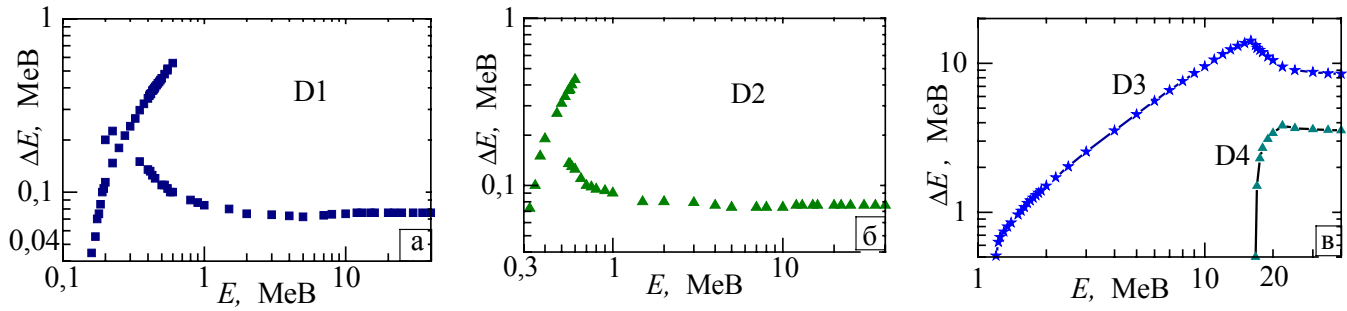


Рис. 4. Залежність від енергії електронів ймовірних значень поглиненої у детекторах енергії: а, б – для кремнієвих матриць D1 і D2; в - для сцинтиляторів D3 і D4

На рис. 5 наведено графіки залежності від енергії первинних частинок середніх значень поглиненої енергії у детекторах приладу “СТЕП-Ф” для протонів і альфа-частинок.

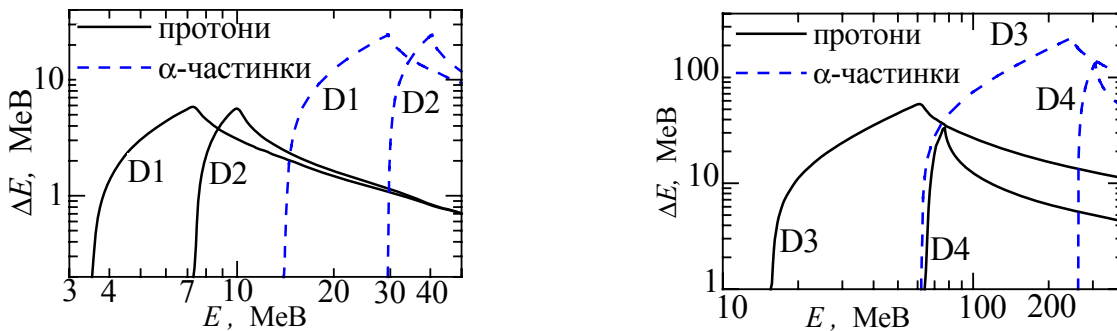


Рис. 5. Залежність середніх значень поглиненої енергії у детекторах приладу “СТЕП-Ф” для протонів і альфа-частинок від енергії первинних частинок

Для оцінки впливу вторинних частинок на амплітуду імпульсів у детекторах, а також оцінки можливих радіаційних ушкоджень детекторів, проведено моделювання генерації вторинних частинок. Абсолютна більшість вторинних частинок утворювалась у сцинтиляторах D3 і D4. Проте їх склад і кількість дозволяли зробити висновок про незначний внесок у можливі радіаційні пошкодження детекторів.

У другому підрозділі з метою розрахунків діапазону енергій електронів, для яких можливе визначення напрямку приходу, проведено моделювання залежності кута розсіювання від енергії первинних електронів, що виходять із детектору D1 приладу.

Обчислення кута розсіювання електронів, що виходять із детектору D1, проводились для елементів, розташованих у центрі матриць (по одному елементу для кожної матриці). Первинні електрони входили у тонкий шар захисної алюмінієвої фольги над центром елементу детектора D1 (рис. 1) перпендикулярно до поверхні. Розсіювання електронів, що пройшли через шар речовини, в основному, було викликано сумарним ефектом багатьох відхилень на невеликі кути. Випадки однократного розсіювання на великі кути призводили до виходу частинки з пучка і досить рідкісні у порівнянні з процесами багатократного розсіювання. На рис. 6 наведено розподіл кута розсіювання електронів із  $E_e=4,5$  MeV, що пройшли через захисну фольгу і детектор D1. Найбільш ймовірне значення кута розсіювання дорівнювало  $\sim 7,85 \pm 0,046$  градусів, тобто менше  $8^\circ$ . При числі випробувань  $N=5 \times 10^5$  число подій у максимумі

$N_e=41296$ , тому похибка дорівнює  $\delta=1/\sqrt{N_e} \approx 0,5\%$ , що достатньо для прикладних задач. Тому для приладу “СТЕП-Ф” визначення напрямку приходу можливо для електронів з енергією  $E_e > 4,5$  MeV (рис. 7).

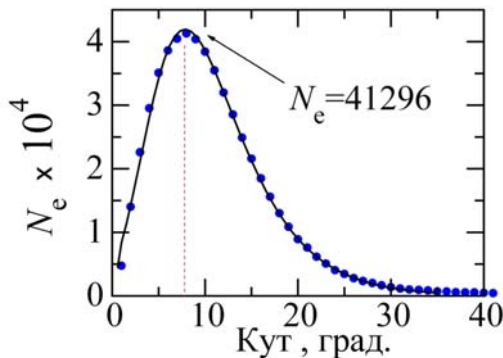


Рис. 6. Розподіл кута розсіювання електронів з енергією  $E_e=4,5$  MeV, які пройшли детектор D1

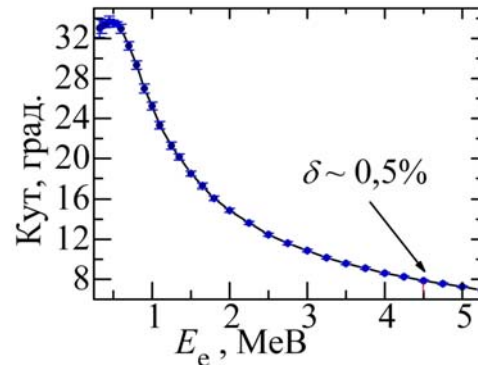


Рис. 7. Залежність від початкової енергії кута розсіювання електронів, які пройшли детектор D1

У третьому підрозділі представлені результати досліджень спектрів, отриманих сцинтиляційним детектором D3 приладу, із використанням джерел іонізуючого випромінювання  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , а також співставлення експериментальних результатів із даними моделювання кількості оптичних фотонів, які сгенеровані у детекторі D3 й досягли фоточутливого елемента. У такий спосіб з'явилася можливість моделювання величини амплітуди світлового спалаху у сцинтиляторах.

У четвертому підрозділі представлені результати натурних випробувань приладу та їх співставлення з даними моделювання. Калібрувальні вимірювання детекторів та блоків електроніки проведені на циклотронному прискорювачі Інституту фізичних та хімічних досліджень (Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN, Японія). Використовувались пучки  $\alpha$ -частинок з енергією  $E_\alpha=100$  MeV/нуклон та іонів  $\text{H}_2$  з енергією  $E_p=70$  MeV/нуклон. Вимірювання дозволили уточнити деякі параметри приладу, зокрема, еквівалентні товщини шарів пакувального матеріалу MgO детекторів D3 і D4, та підтвердили правильність розрахунків.

У таблиці 1 наведено розрахункові діапазони енергій частинок, які реєструються детекторами приладу “СТЕП-Ф”. Ці величини мають практичне значення на етапі розробки приладу для підтвердження його області застосовності.

Таблиця 1

**Діапазони енергій частинок, які реєструються детекторами приладу (MeV)**

Тип частинок	D1	D2	D3	D4
Електрони	0,2 – 0,425	0,425 – 0,5	1,2 – 15,5	16,7 – 20
Протони	3,5 – 7,2	7,2 – 10	15,5 – 61	64 – 77
Альфа-частинки	13,5 – 29,4	29,4 – 40	62 – 248,5	262 – 307

Отримана методом обчислювального експерименту сукупність характеристик приладу дозволила виготовити дослідний макет та провести його натурні випробування, за результатами яких створено робочий екземпляр приладу, що був встановленим на космічному апараті і успішно відпрацював на орбіті Землі за заданою програмою наукового експерименту.

У четвертому розділі “Розробка і дослідження детекторного блоку приладу для визначення напрямку на джерело  $\gamma$ -випромінювання” досліджені фізичні процеси, які відбуваються у складових частинах детекторного блоку приладу ДМДП для визначення напрямку на точкове джерело випромінювання.

У першому підрозділі розроблено математичну модель приладу та досліджено можливість однозначного визначення напрямку на джерело  $\gamma$ -квантів низьких енергій ( $E_\gamma < 1$  MeV) за допомогою приладу, що розроблюється. На рис. 8 представлено схему взаємного розташування детекторів приладу ДМДП.

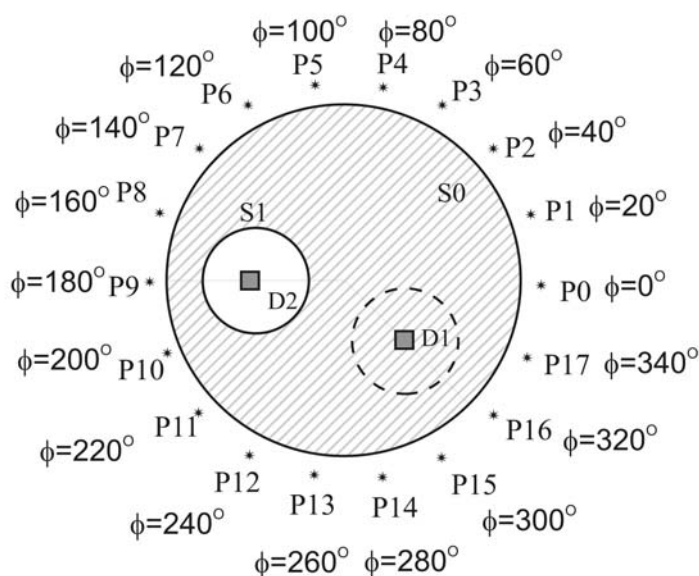


Рис. 8. Взаємне розташування детекторів:  $S0$  – алюмінієва куля діаметром 50 мм;  $D1$  і  $D2$  –  $CdTe$  детектори, кожний з яких куб із ребром 5 мм;  $P0$ - $P17$  – місця розташування джерела  $\gamma$ -квантів під час моделювання

У другому підрозділі нами проведено дослідження методів моделювання електромагнітних процесів низьких енергій для приладу, що розроблюється, та обрано найбільш ефективну модель. Досліджені модель “Livermore” та модель “Penelope” бібліотеки класів Geant4 та проведено співставлення результатів розрахунків із даними експериментальних досліджень. Із використанням обох моделей проведено моделювання проходження  $\gamma$ -квантів через детекторний блок приладу ДМДП. Число первинних  $\gamma$ -квантів для обох способів моделювання дорівнює  $10^8$ ; енергія  $E=661,6$  кеВ, тому що в експериментах з прототипом приладу у якості джерела  $\gamma$ -квантів використовувався ізотоп  $^{137}\text{Cs}$  ( $\gamma$ -кванти з енергією 661,6 кеВ). На рис. 9 наведено спектри поглиненої у детекторі  $D2$  енергії, які розраховані двома способами. Джерело  $\gamma$ -квантів розташоване у точці  $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=180^\circ$  (рис. 8), випромінювання моделюється рівномірно в  $4\pi$ . Дані, що відповідають фотоефекту, на рис. 9 не наведені з метою кращого представлення даних комптонівського розсіювання. Спектри, отримані з використанням обох моделей, практично ідентичні, але програма, що базується на моделі “Penelope” вимагала більше часу за рахунок громіздких обчислень. Для подальших розрахунків використовувалась програма, що розроблена нами на базі моделі “Penelope” електромагнітних процесів низьких енергій.

Задачу визначення напрямку приходу  $\gamma$ -квантів може бути вирішено методом підрахунку різниці потоків  $\gamma$ -квантів у детекторах  $D1$  і  $D2$ , яка є результатом того, що  $\gamma$ -кванти проходять різний шлях у речовині  $S0$  до реєстрації детекторами. Нами було розраховано діапазон азимутальних кутів точки розташування джерела  $\gamma$ -квантів, для котрих можливо визначення напрямку приходу, який складав від  $\varphi = -40^\circ$  до  $\varphi \approx 160^\circ$ . Нами запропоновано зміни у конструкції детекторного блоку приладу, в результаті чого діапазон визначення напрямку на джерело  $\gamma$ -квантів було розширено на  $18^\circ$  за рахунок зміщення розташування детектору  $D2$  у порожнині  $S1$ .

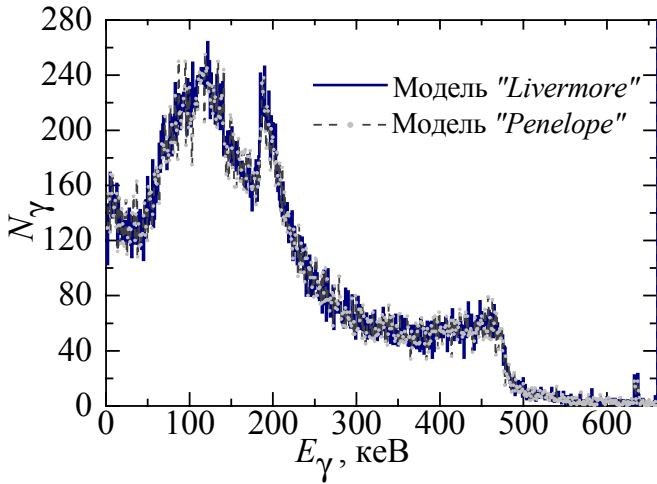


Рис. 9. Змодельовані двома способами спектри поглиненої енергії у детекторі D2 для  $10^8$   $\gamma$ -квантів з енергією 661,6 кеВ

Показано, що коефіцієнти  $k_M$  суттєво різнились при різному положенні джерела відносно детекторів D1, D2. Це пояснюється тим, що потоки  $\gamma$ -квантів до поглинання у D1 або D2 проходили шари поглинаючої речовини різної товщини (залежно від положення джерела випромінювання). Отже, при зміні азимутального положення джерела щодо установки спостерігалась виразна зміна повного числа відліків у спектрі, а також числа відліків у піку повного поглинання. Розраховані коефіцієнти  $k_M$ , а також експериментальні дані  $k_E$  відношення суми сигналів, зареєстрованих детектором D1, до суми сигналів, зареєстрованих детектором D2, в залежності від розташування джерела  $\gamma$ -квантів, наведені на рис. 10.

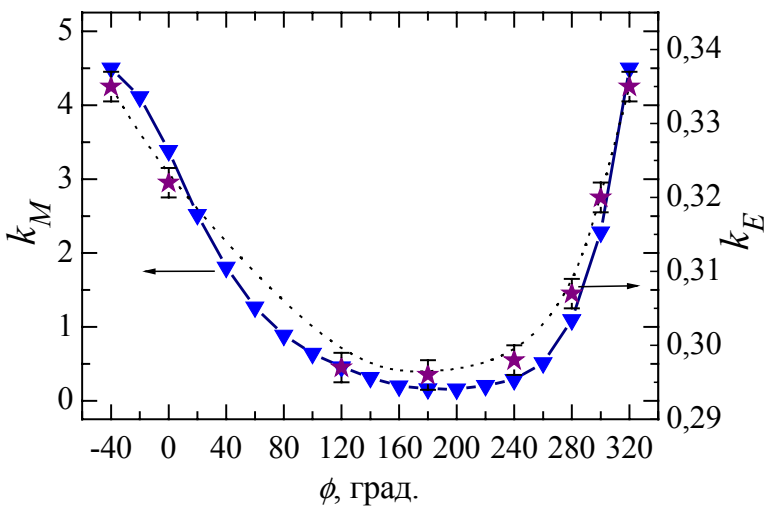


Рис. 10. Коефіцієнти відношення суми сигналів, зареєстрованих детектором D1, до суми сигналів, зареєстрованих детектором D2:  $\star$  – експериментальні дані;  $\blacktriangledown$  – результати моделювання;  $k_M$  та  $k_E$  – змодельовані та експериментальні коефіцієнти, відповідно;  $\phi$  – азимутальний кут точки розташування джерела  $\gamma$ -випромінювання, градуси

Джерело  $\gamma$ -квантів було розташовано послідовно у точках P0-P17 (рис. 8). Число випромінених джерелом в  $4\pi$   $\gamma$ -квантів задавалося однаковим і рівним  $10^8$ . В обчислювальному експерименті визначались коефіцієнти  $k_M$  відношення сумарної кількості сигналів, зареєстрованих детектором D1, до сумарної кількості сигналів, зареєстрованих детектором D2 (сумарне значення процесів фотоефекту та комптонівського розсіювання, тому що у реальному експерименті детектори приладу працювали у лічильному режимі, аналіз спектрів не проводився).

Можна стверджувати, що існує достатня чутливість методу вимірювання двох сигналів з двох незалежних детекторів для визначення напрямку на джерело  $\gamma$ -квантів. Вивчаючи зміну спектрів при зміні положення джерела  $\gamma$ -квантів, зроблено висновок про можливість використання установки для визначення напрямку приходу  $\gamma$ -квантів у діапазоні азимутальних кутів  $-40^\circ \div 200^\circ$  при зміщенні детектора D2 відносно центра S1. Для розширення діапазону кутів було внесено зміни у існуючий прототип приладу.

У третьому підрозділі проведено удосконалення детекторного блоку приладу ДМДП, за рахунок чого стало можливим визначення напрямку на точкове джерело  $\gamma$ -випромінювання у півпросторі. На рис. 11 наведено схему розташування детекторів удосконаленого детекторного блоку приладу, в якому використовуються три детектори CdTe, причому детектори D2 і D3 зміщені відносно центрів сферичних порожнин S1 і S2. Проведено дослідження відгуку детекторів для різних позицій розташування джерела  $\gamma$ -квантів навколо детекторного блоку з кроком 10 градусів. Для обробки інформації і подальшого аналізу даних моделювання нами розроблено відповідну програму. У якості вхідних використовуються дані, які є результатом роботи програми, котра моделює процеси, що відбуваються у речовині детекторів. Зіставляючи рівні сигналів у детекторах D1 і D2, а також у детекторах D2 і D3, можна визначити напрямок на точкове джерело  $\gamma$ -квантів.

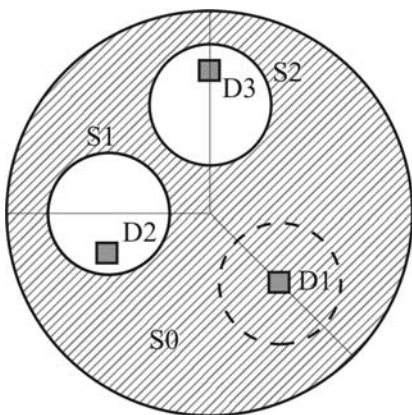


Рис. 11. Схема взаємного розташування детекторів: S0 – алюмінієва куля радіусом 50 мм; D1, D2, D3 – детектори CdTe

Коефіцієнти відношення інтенсивностей змодельованих потоків  $\gamma$ -квантів у детекторах D1 і D2, D2 і D3 зберігались у двовимірному масиві. При визначенні напрямку на джерело випромінювання введені величини, які дорівнювали мінімальним значенням відхилення рівнів сигналу по відношенню до змодельованих коефіцієнтів. Для визначення напрямку на джерело випромінювання з точністю краще, ніж крок моделювання, у програмі впроваджений алгоритм інтерполяції значень відношення інтенсивностей сигналів. У результаті інтерполяції кубічними сплайнами стало можливим визначення напрямку на джерело випромінювання у півпросторі з точністю 3÷5 градусів. Тому можна зробити висновок, що при вдосконаленні наявного прототипу приладу можна визначити у півпросторі напрямок на точкове джерело  $\gamma$ -випромінювання.

Прилад, що розроблювався, має задовільну кутову чутливість, якої цілком достатньо для практичного застосування цього приладу для визначення напрямку на точкове джерело  $\gamma$ -квантів.

**П'ятий розділ “Конвертор гальмівного випромінювання”** складається з двох підрозділів. *Перший підрозділ* присвячено дослідженню фізичних процесів, які відбуваються у складових частинах конвертора гальмівного випромінювання для створення ізотопів медичного призначення, та проведена оптимізація конвертора. Необхідним етапом фотоядерного методу виробництва медичних ізотопів є конвертація потоку прискорених електронів у високоенергійне гальмівне випромінювання, котрим діють на цільову мішень. Внаслідок відносно малого перерізу фотоядерних реакцій у поєднанні з великою проникаючою здатністю гальмівних  $\gamma$ -квантів область генерації нових ядер виявляється досить великою і не має чітких меж. Отже, розподіл ізотопного продукту є істотно неоднорідним, і величина фотоядерного виходу ізотопів залежить від розмірів мішені, а також від місця її розміщення в потоку гальмівного випромінювання. Тому необхідна оптимізація конвертера гальмівного випромінювання для отримання максимуму питомої активності мішені. Необхідні

дослідження проведені з використанням математичного моделювання на основі моделі фізичних процесів, запропонованої у розділі 2 даної роботи. На рис. 12 наведено фрагменти 3D-моделі установки та OpenGL-візуалізація конвертору й мішеневого пристрою.

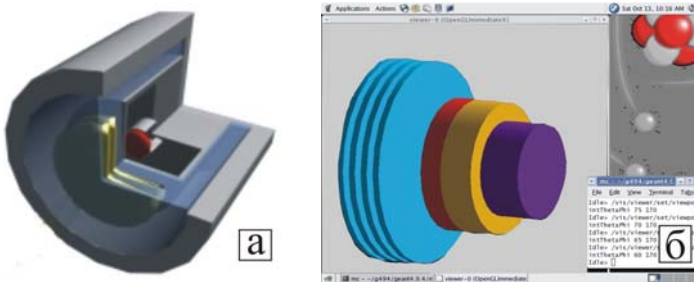


Рис. 12. Фрагмент 3D-моделі конвертора (а) та скрін-шот (б) розробленої програми

З метою визначення залежності інтенсивності гальмівного випромінювання від матеріалу конвертора проведено обчислювальні експерименти. Найбільша інтенсивність гальмівного випромінювання отримана при використанні іридію у якості матеріалу конвертора, а найменша – із свинцю (на 34% менше).

Інші дослідження (Au, Pt, Ta, W) дали проміжні значення. Для подальших експериментів у зв'язку із дорожнечою іридію (і, меншою, мірою, зі складністю його обробки) були обрані тантал і вольфрам. На рис. 13 наведені розрахункові дані про утворення  $\gamma$ -квантів з енергіями від 8 до 20 MeV при енергії первинних електронів у діапазоні 20÷80 MeV із використанням танталового конвертору.

При дослідженні виходу випромінювання із конвертора важливо знати, як змінюється відношення інтенсивностей нейтронної і фотонної компонент  $N_n/N_\gamma$  із збільшенням початкової енергії електронів. Обчислювальний експеримент показав, що ця залежність для всіх досліджених матеріалів має вигляд, наведений на рис. 14: значення  $N_n/N_\gamma$  для досліджуваної моделі конвертера мало змінюється при збільшенні енергії електронів від 30 до 80 MeV. Отримано спектральні і кутові характеристики гальмівного випромінювання і потоку нейтронів від гальмівного конвертера, що дозволяє використовувати конвертер для виробництва медичних ізотопів.

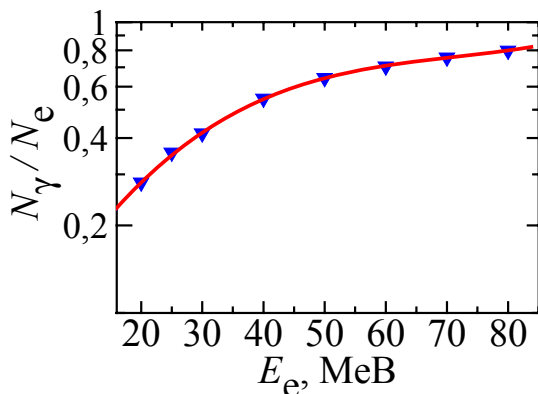


Рис. 13. Залежність відношення інтенсивностей фотонної і електронної компонент  $N_\gamma/N_e$  від енергії  $E_e$  первинних електронів

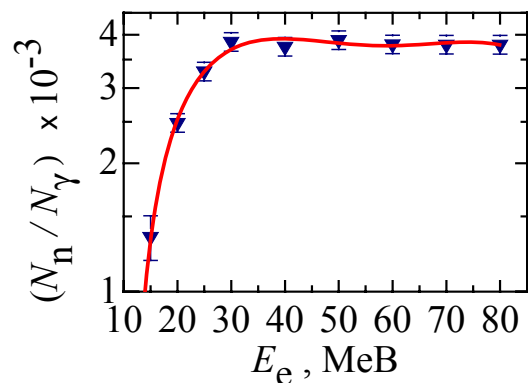


Рис. 14. Залежність відношення інтенсивностей нейтронної і фотонної компонент  $N_n/N_\gamma$  від енергії  $E_e$  первинних електронів

Проведені дослідження дають змогу оцінити активності цільових ізотопів, що створюються у реакціях з нейтронами, для визначення найбільш перспективних ізотопів для фотоядерного виробництва.



У другому підрозділі проведені дослідження фізичних процесів, які відбуваються у складових частинах конвертора гальмівного випромінювання для вивчення механізмів фотоутворення ізоотопу  $^7\text{Be}$ . Вважається, що основні реакції, що призводять до утворення ізоотопів берилію в атмосфері Землі, протікають при взаємодії космічних променів з ядрами азоту і кисню, які є основними складовими атмосферного повітря. Іншим можливим механізмом утворення ізоотопу  $^7\text{Be}$  у верхніх шарах атмосфери можуть бути фотоядерні реакції. Цей механізм до теперішнього часу не враховувався. Оскільки азот і кисень є основними компонентами атмосферного повітря, то саме реакції на цих ядрах представляють особливий інтерес для аналізу фотоядерного механізму утворення  $^7\text{Be}$  в атмосфері. Для розрахунку швидкості утворення ізоотопів  $^7\text{Be}$  у земній атмосфері завдяки цьому механізму необхідно знати переріз фотоядерних реакцій. Для обчислення перерізу фотоутворення ізоотопу  $^7\text{Be}$  необхідне знання густини потоку гальмівних фотонів у місці розташування мішеней. З цією метою була розроблена математична модель опромінювального стенду "КІРТ2" і проведені обчислювальні експерименти. На рис. 15 представлено енергетичний спектр гальмівних  $\gamma$ -квантів з енергіями від 20 до 90 МеВ, що пройшли танталовий конвертор, для  $2,3 \cdot 10^7$  первинних електронів з енергією  $E_e = 90$  МеВ. Для порівняння на рис. 15 також наведено (тонка лінія) характерний спектр Шиффа для тонкого конвертора. Відмінності у низькоенергетичній частині спектру  $\gamma$ -квантів зумовлені тим, що конвертор гальмівного випромінювання має товщину більше 1 радіаційної довжини.

Нами проведені дослідження з оптимізації параметрів опромінювального стенду, що призначений для дослідження процесу утворення ізоотопу  $^7\text{Be}$  у мішенях  $\text{AlN}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}$ . На рис. 16 представлені енергетичні спектри  $\gamma$ -квантів з енергією від 18 до 40 МеВ, що пройшли через конвертор та мішені, для  $6,24 \cdot 10^6$  первинних електронів з енергією  $E_e = 40$  МеВ.

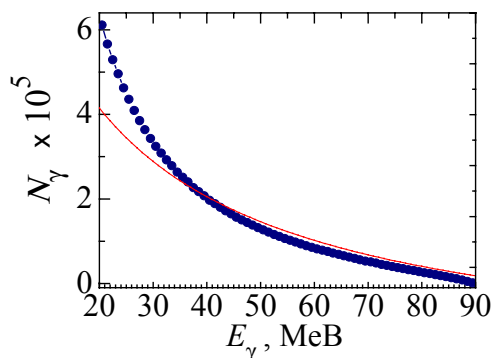


Рис. 15. Змодельований спектр гальмівних  $\gamma$ -квантів, що пройшли танталовий конвертор (точки на графіку), для первинних електронів з енергією  $E_e = 90$  МеВ

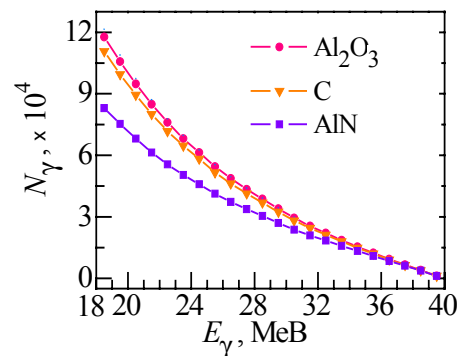


Рис. 16. Енергетичні спектри гальмівних  $\gamma$ -квантів у мішенях  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{AlN}$  для  $6,24 \cdot 10^6$  первинних електронів з енергією  $E_e = 40$  МеВ

На основі змодельованих спектрів з урахуванням порога фотоядерних реакцій визначалася густина потоку  $\gamma$ -квантів гальмівного випромінювання для кожної мішені. Надалі ці результати, разом із експериментальними даними, були використані для обчислення методом різниці фотонів перерізу фотоутворення  $^7\text{Be}$  на ядрах  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$ .

## ВИСНОВКИ

1. Вперше розроблено модель і досліджено фізичні процеси, що відбуваються в детекторах супутникового спектрометра-телескопа “СТЕП-Ф” наукового космічного експерименту “КОРОНАС-ФОТОН”. Показано, що прилад дозволяє реєструвати електрони у діапазоні енергій 0,2-20 МеВ; протони – у діапазоні енергій 3,5-77 МеВ; альфа-частинки – у діапазоні енергій 13,5-307 МеВ. Розраховані найбільш імовірні значення поглинених енергій для фіксованих значень енергій первинних частинок, що необхідно для моделювання та оцінки відгуку детекторів. Проведено моделювання генерації вторинних частинок, визначено їх типи, кількість і відносний внесок. Показано, що у сцинтиляційних детекторах при реєстрації протонів утворюється абсолютна більшість вторинних частинок. Загальне число вторинних частинок, що припадає на один первинний протон, змінюється від 0,16 до 1,4 при збільшенні енергії протонів від 50 МеВ до 300 МеВ. Склад і кількість вторинних частинок дозволяють зробити висновок про незначну вірогідність радіаційних пошкоджень детекторів.
2. Вперше проведено дослідження залежності кута розсіювання електронів від енергії первинних електронів, що виходять з детекторів приладу “СТЕП-Ф”. На основі цього дослідження показано, що для первинних електронів з енергією  $\sim 4,5$  МеВ і більше можливе визначення напрямку приходу частинки шляхом реєстрації її елементами кремнієвих матриць з ідентичними номерами системи детекторів D1-D2. Показано, що для протонів та альфа-частинок можливе визначення напрямку приходу із заданою точністю  $< 8^\circ$ . Показано, що сигнали від сусідніх елементів детекторів D1 і D2 не мають взаємного впливу при реєстрації протонів і альфа-частинок високої енергії.
3. Вперше розроблено та досліджено модель приладу для визначення напрямку на точкове джерело випромінювання. Запропоновано спосіб визначення напрямку приходу  $\gamma$ -квантів у систему, в якій детектор зміщено відносно геометричного центру порожнини, у котрій він розташований. Дана корекція, внесена в геометричні параметри детекторного блоку приладу, дозволяє на  $18^\circ$  розширити діапазон напрямків реєстрації  $\gamma$ -квантів. Методом обчислювального експерименту встановлено область застосовності приладу: показано, що визначення напрямку на точкове джерело  $\gamma$ -випромінювання можливо у діапазоні азимутальних кутів від  $-40^\circ$  до  $200^\circ$ .
4. Вперше проведено співставлення експериментальних даних відношення інтенсивності сигналів у детекторах приладу для визначення напрямку на джерело випромінювання та даних двох способів чисельного моделювання, яке використовується у якості альтернативи лабораторним дослідженням електромагнітних процесів, які відбуваються у речовині детекторних блоків приладу при реєстрації  $\gamma$ -квантів з енергією до 1 МеВ. Встановлено, що модель, яка базується на даних Ліверморської лабораторії, для даного класу задач є найбільш ефективною.
5. Розроблена і досліджена модель конвертера гальмівного випромінювання для дослідження характеристик випромінювального стенду. Методом Монте-Карло змодельовані характеристики гальмівного і нейтронного випромінювання від мішеневого пристрою складної конфігурації. Отримано спектральні і кутові ха-

рактеристики гальмівного випромінювання і потоку нейтронів від гальмівного конвертера, що дозволяє використовувати конвертер для виробництва медичних ізотопів.

6. Методом обчислювального експерименту проведені дослідження виходу і кутового розподілу гальмівного випромінювання від товстого конвертеру, завдяки чому разом із експериментальними дослідженнями опромінених мішеней були проведені оцінки середніх значень перерізів (від порога до 90 MeV) реакцій  $A(\gamma, X)\text{Be}^7$  на елементах С, N і O природного ізотопного складу. На підставі вимірних перерізів фотоутворення  $^7\text{Be}$ , а також моделювання ядерно-електромагнітного каскаду в атмосфері, з'явилася можливість вперше дослідити внесок фотоядерного механізму у виробництво космогенного радіоізоотопу  $^7\text{Be}$  у земній атмосфері.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 1. Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати

1. Dudnik O.V. Computer simulation and calibration the charge particle spectrometer-telescope "STEP-F" / O.V. Dudnik, T. Goka, H. Matsumoto, M. Fujii, V.K. Persikov, **T.V.Malykhina** // *Advances in Space Research.*– 2003.– Vol.32, №. 11.– P 2367-2372.
2. Дудник А.В. Моделирование прохождения заряженных частиц через спутниковый спектрометр-телескоп СТЭП-Ф / А.В. Дудник, **Т.В. Малыхина** // *Вісник Харківського національного університету. Серія фізична: Ядра, частинки, поля.* – 2001. – Вип. 3 (15). – С. 53-60.
3. **Малыхина Т.В.** Исследование поля смешанного  $X,\eta$  излучения при фотоядерном производстве изотопов / **Т.В. Малыхина**, А.А. Торговкин, А.В. Торговкин, В.Л. Уваров, В.А. Шевченко, И.В. Шляхов, Б.И. Шраменко // *Питання атомної науки і техніки. Серія: Ядерно-фізичні дослідження.* – 2008, № 5. – С. 184-188.
4. Bezuglov M.V. Photonuclear production of cosmogenic beryllium-7 in the terrestrial atmosphere / M.V. Bezuglov, V.S. Malyshevsky, G.V. Fomin, A.V. Torgovkin, B.I.Shramenko, **T.V. Malykhina** // *Physical Review C* 86.– 2012. – 024609 – P. 1-5.
5. Dovbnya A.N. Experimental Cross-Section Evaluation Data for  $^7\text{Be}$  Photoproduction by  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$  Nuclei in the Energy Range Between 40...90 MeV / A.N.Dovbnya, O.S.Deyev, V.A.Kushnir, V.S.Malyshevsky, **T.V.Malykhina**, V.V.Mitrochenko, S.A.Perezhogin, A.V.Torgovkin, G.V.Fomin, B.I.Shramenko // *Problems Of Atomic Science And Technology.* – 2013. – № 6 (88). – P. 192-195.
6. Bezuglov M.V. Photonuclear Channel of  $^7\text{Be}$  Production in the Earth's Atmosphere / M.V. Bezuglov, V.S. Malyshevsky, **T.V. Malykhina**, A.V. Torgovkin, G.V. Fomin, B.I. Shramenko // *Physics of Atomic Nuclei.* – 2012, Vol. 75, №. 4. – P. 393-397.
7. Фоторождение космогенного бериллия-7 в земной атмосфере [Электронный ресурс] / М.В. Безуглов, В.С. Малышевский, **Т.В. Малыхина**, А.В. Торговкин, Г.В. Фомин, Б.И. Шраменко // *Исследовано в России* – 2011. – Т. 14. – № 46. – С. 589-601. – Режим доступа до журн.: <http://sci-journal.ru/articles/2011/046.pdf>
8. **Малыхина Т.В.** Компьютерное моделирование установки для локализации источника гамма-излучения / Т.В. Малыхина, В.В. Марущенко, А.В. Сакун, Н.Г. Стервиедов // *Вісник Харківського національного університету. Серія: Ма-*

тематичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2010. – Вип. 14 (925). – С. 132-139.

## 2. Наукові праці, які додатково відображають наукові результати

9. Дудник А.В. Компьютерное моделирование поглощенной энергии и пробегов частиц в спектрометре СТЭП космического проекта “Попередження” / А.В. Дудник, **Т.В. Малыхина** // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т.9, № 1. – С. 15-21.
10. **Malykhina T.V.** The comparison of the results of different electromagnetic process models in Geant4 for the modeling of the response of the point-like gamma-radiation source detection unit / T.V. Malykhina // Contemporary problems of mathematics, mechanics and computing sciences. – Харків, 2011. – С. 288-294.
11. Сорока Л.С. Разработка переносного прибора для локации источника излучения / Л.С. Сорока, Н.Г. Стервиедов, **Т.В. Малыхина** // Вісник Академії митної служби України. Серія: Технічні науки. – 2011. – № 2 (46). – С. 102-109.
12. **Малихіна Т.В.** Моделювання електромагнітних процесів низьких енергій взаємодії випромінювання з речовиною при розробці детекторів / Т.В. Малихіна // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2011. – № 42. – С. 126-132.
13. **Малыхина Т.В.** Программы обработки результатов работы модели устройства для локации источника гамма-излучения / Т.В. Малыхина, Н.Г. Стервиедов // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 3 (101). – С. 45-49.
14. **Малихіна Т.В.** Математичне моделювання проходження електронів через шар речовини як складова частина віртуального лабораторного практикуму з ядерної фізики / Т.В. Малихіна, М.Г. Стервиедов // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2012. – № 27. – С. 144-153.

## 3. Наукові праці апробаційного характеру

15. Дудник А.В. Компьютерное моделирование прохождения частиц через детекторы спектрометра СТЭП-Ф / А.В. Дудник, **Т.В. Малыхина**, В.К. Персиков // Сб. трудов конференции [“Научная сессия МИФИ-2003”], (Москва, 27–31 января 2003 г.) / Москва, 2003. – Т. 7, С. 51-52.
16. Григорьев А.Н. Компьютерное моделирование установки для локализации источника гамма-излучения / А.Н. Григорьев, **Т.В. Малыхина**, Н.Г. Стервиедов, А.В. Сакур // Труды научно-технической конференции с международным участием [“Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях КМНТ-2010”], (Харьков, 18–21 мая 2010 г.) / Харьков, 2010. – Ч. 2. – С. 69–70.
17. **Малихіна Т.В.** Комп’ютерне моделювання пристрою для локації точкових джерел випромінювання / Т.В. Малихіна, В.О. Шпагіна, Л.О. Шпагіна // Матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених [“CSE-2010”], (Львів, 25–27 листопада 2010 р.) / Львів, 2010. – С. 208–209.
18. **Малыхина Т.В.** Разработка детекторного блока прибора для локации источника гамма-излучения / Т.В. Малыхина, В.С. Посухов, Н.Г. Стервиедов, А.Н. Григорьев, В.В. Марущенко, А.В. Сакур // Тезисы докладов IX Конференции по

- фізиці високих енергій, ядерній фізиці і прискорювачам, (Харьков, 21–25 лютого 2011 г.) / Харьков, 2011. – С. 100.
19. **Малыхина Т.В.** Розробка програмного забезпечення для обробки даних віртуального фізичного експерименту / Т.В. Малыхина, Н.Г. Стервєдов, В.О. Шпагина, Л.О. Шпагина // Матеріали ІV Всеукраїнської науково-практичної конференції [“Інформаційні процеси і технології. Інформатика-2011”], (Севастополь, 25–29 квітня 2011 г.) / Севастополь, 2011. – С. 101–102.
20. **Malykhina T.** The results of data processing the Rutherford backscattering physical experiments studies / T. Malykhina // Матеріали міжнародної конференції [“Комп’ютерні науки для інформаційного суспільства”], (Луганськ, 12–13 грудня 2012 р.) / Луганськ, 2012. – С. 83–85.
21. Довбня А.Н. Експериментальні результати визначення сечення фотородження  ${}^7\text{Be}$  на ядрах  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{N}$ ,  ${}^{16}\text{O}$  в діапазоні енергій 40..90 МєВ / А.Н. Довбня, А.С. Дєєв, А.В. Казаков, В.А. Кушнір, В.С. Малышевский, **Т.В. Малыхина**, В.В. Митроченко, С.А. Пережогин, А.В. Торговкин, Г.В. Фомин, Б.И. Шраменко // Матеріали ХХІІІ Міжнародного семінару по прискорювачам заряджених частиць (Алушта, 8–14 вересня 2013 г.) / Алушта, 2013. – С. 130.
22. **Малыхина Т.В.** Розробка математичної моделі детекторного блоку приладу для реєстрації випромінювання / Т.В. Малыхина // Тезиси Міжнародної школи-конференції [“Тараповські читання-2013”], (Харьков, 29 вересня – 4 жовтня 2013 г.) / Харьков, 2013. – С. 102-103.

### АНОТАЦІЯ

**Малыхина Тетяна Василівна. Моделювання детектуючих систем пошуку джерел іонізуючого випромінювання. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фіз.-мат. наук за спеціальністю “01.04.01 – фізика приладів, елементів та систем”. – Сумський державний університет, Суми, 2015.

Дисертаційну роботу присвячено розв’язанню актуальної науково-прикладної задачі – визначенню і оптимізації технічних характеристик пристроїв для пошуку та ідентифікації джерел випромінювання шляхом дослідження методом Монте-Карло фізичних процесів, що відбуваються у речовині приладів під дією електромагнітного випромінювання. Зокрема, проведено дослідження фізичних процесів, що відбуваються у речовині детекторів супутникового спектрометра-телескопа “СТЕП-Ф” наукового космічного експерименту “КОРОНАС-ФОТОН”. Показано, що прилад дозволяє реєструвати електрони в діапазоні енергій 0,2-20 МєВ; протони – в діапазоні енергій 3,5-77 МєВ; альфа-частинки – в діапазоні енергій 13,5-307 МєВ. Встановлено, що визначення напрямку приходу електронів можливо для частинок з енергією більше 4,5 МєВ.

Досліджені фізичні процеси, що впливають на амплітуду імпульсів у детекторах приладу для визначення напрямку на джерело  $\gamma$ -випромінювання. За рахунок зміщення детекторів приладу відносно центрів порожнин, в яких вони розташовані, діапазон напрямків реєстрації  $\gamma$ -квантів розширено на  $18^\circ$ .

Розроблено і досліджено модель конвертора гальмівного випромінювання. Отримано спектральні й кутові характеристики гальмівного випромінювання і потоку

нейтронів від гальмівного конвертора, що дозволяє використовувати конвертор для виробництва медичних ізотопів, а також для дослідження механізмів утворення ізотопу  ${}^7\text{Be}$  у атмосфері Землі.

**Ключові слова:** Дослідження детекторів випромінювання, моделювання електромагнітних процесів, розробка детекторних блоків.

### АННОТАЦІЯ

**Малыхина Татьяна Васильевна. Моделирование детектирующих систем поиска источников ионизирующего излучения. – Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата физ.-мат. наук по специальности “01.04.01 – физика приборов, элементов и систем”. – Сумский государственный университет, Сумы, 2015.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи – определению и оптимизации свойств и технических характеристик устройств для поиска и идентификации источников излучения путем исследования методом Монте-Карло физических процессов, происходящих в веществе приборов под действием ионизирующего излучения. Решению указанной задачи в работе предшествует исследование математических аспектов компьютерного моделирования физических процессов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом и анализ проблем, существующих в данной области.

Проведено исследование физических процессов, происходящих в веществе детекторных блоков приборов для регистрации ионизирующего излучения, а также технических устройств, разрабатываемых для изучения характеристик излучения, в частности, спутникового спектрометра-телескопа “СТЭП-Ф” научного космического эксперимента “КОРОНАС-ФОТОН”; прибора для определения направления на точечный источник гамма-излучения; конвертера тормозного излучения.

Показано, что прибор “СТЭП-Ф” позволяет регистрировать электроны в диапазоне энергий 0,2-20 МэВ; протоны – в диапазоне энергий 3,5-77 МэВ; альфа-частицы – в диапазоне энергий 13,5-307 МэВ. Для первичных электронов с энергией 4,5 МэВ и более возможно определение направления прихода частицы путем регистрации её элементами кремниевых матриц с идентичными номерами системы детекторов D1–D2. Проведено моделирование генерации вторичных частиц и показано, что в сцинтилляционных детекторах при регистрации протонов образуется абсолютное большинство вторичных частиц, определены их энергии. Показано, что вклад вторичных частиц в возможные радиационные повреждения детекторов прибора является незначительным.

Исследованы физические процессы, влияющие на амплитуду импульсов в детекторах прибора для определения направления на точечный источник  $\gamma$ -излучения. Показано, что определение направления на источник излучения возможно в диапазоне азимутальных углов от  $-40^\circ$  до  $200^\circ$ . Предложен способ определения направления прихода  $\gamma$ -квантов в систему, в которой детекторы смещены относительно геометрических центров полостей, в которых они расположены. Данная коррекция позволяет расширить диапазон направлений регистрации  $\gamma$ -квантов.

Разработана и исследована модель конвертора тормозного излучения. Получены спектральные и угловые характеристики тормозного излучения и потока нейтронов

от тормозного конвертора, что позволяет использовать конвертор для производства медицинских изотопов, а также для оценки средних значений сечений (от порога до 90 МэВ) реакций  $A(\gamma, X)\text{Be}^7$  на элементах С, N и O природного изотопного состава, что позволяет исследовать вклад фотоядерного механизма в производство радиоизотопа  $^7\text{Be}$  в земной атмосфере.

**Ключевые слова:** Исследование детекторов излучения, моделирование электромагнитных процессов, разработка детекторных блоков.

### ABSTRACT

**Malykhina Tetiana Vasilivna. Simulation of detecting systems for ionizing radiation sources searching. – Manuscript.**

Thesis for the scientific degree in physics and mathematics by specialty “01.04.01 – physics of devices, components and systems”. – Sumy State University, Sumy, 2015.

The thesis is devoted to solving the actual scientific and applied problem of determining and optimization the properties and technical characteristics of devices for searching and identifying the radiation sources by means of Monte Carlo simulation of the physical processes occurring in detector materials under the electromagnetic irradiation, and comparison of the results with the experimental data. In particular, a study of the physical processes occurring in the material of the “STEP-F” satellite spectrometer telescope has been done. It is shown that the device allows one to register electrons in the energy range 0.2-20 MeV, protons in the energy range 3.5-77 MeV and alpha-particles in the energy range 13.5-307 MeV. It has been shown that it is possible to determine the angle of arrival for electrons with energies higher than 4.5 MeV.

Physical processes that affect pulse amplitude in detectors of the device designed for determining the direction of gamma-radiation source were investigated. The range of gamma-rays registration directions is increased by 18 degrees due to the shift of detectors inside cavities in which they are located.

The bremsstrahlung converter model has been developed and investigated. Spectral and angular characteristics of bremsstrahlung and neutron flux from the converter were obtained. These results allow us to use a converter for the production of medical isotopes, as well as for the study of the mechanisms of the isotope  $^7\text{Be}$  formation in the Earth's atmosphere.

**Keywords:** Investigation of radiation detectors, modeling of electromagnetic processes, the development of detector blocks.

Підписано до друку 22.01.2015 р.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 70

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007 р.