

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет природоохоронний
Кафедра загальної та теоретичної фізики

Бакалаврська кваліфікаційна робота

на тему: «Ідентифікація радіонуклідного вмісту промислової продукції за допомогою віртуального γ - спектрометра «ГаммаЛаб»

Виконав студент 4 року навчання
групи ТЗ-41
спеціальності 183 «Технології
захисту _____ навколишнього
середовища» _____
Алієва Аліна Рафаелівна

Керівник ст.викладач _____
Співак Андрій Ярославович

Консультант д.ф.-м.н., професор _____
Герасимов Олег Іванович

Рецензент д.ф.-м.н, професор _____
Ковальчук Володимир Володимирович

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет природоохоронний
Кафедра загальної та теоретичної фізики
Рівень вищої освіти бакалавр
Спеціальність 183 Технології захисту навколишнього середовища
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри загальної та
теоретичної фізики Герасимов О.І.

“ 20 ” квітня 2020 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Алієвій Аліні Рафаелівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Ідентифікація радіонуклідного вмісту промислової продукції за допомогою віртуального γ - спектрометра «ГаммаЛаб»

керівник роботи ст..викладач Співак Андрій Ярославович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ 16 ” квітня 2020 року № 39 – «С»

2. Строк подання студентом роботи 14.06.2020
3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1.Опис можливостей «Гамма-лаб. 2 Калібрувальні процедури

3 Тестування програм обробки гамма-спектрів. 4. Структура і можливості RadDecay

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Рис.1.1 Функціональна схема комплексу GammaLab. Рис.1.2 HPGe коаксіальний (зліва) і сцинтиляційний (праворуч) детектори. Рис.1.3 Моделі коліimatorов: зліва - коліimator для захисту від навколишнього фону, праворуч – коліimator для зниження вхідного завантаження в разі

вимірювання високоактивних зразків. Рис.1.4 Схематичні зображення контейнерів КТ1-10, КІЗ-0.5 і КТ 1-0.3 \ 0090 з точковим гамма-джерелом. Рис.1.5 Схема моделювання апаратурних спектрів в реальному часі. Рис.1.6 Емуляція спектра джерела Cs-137 в режимі реального часу. Рис.2.1 Функції відгуку для точкового джерела і детектора на основі кристала NaI (63x63 мм), розраховані за допомогою програмного комплексу GammaLab. Рис.2.2 Модельний і реальний спектри Eu-152. Рис.2.3 Оболонка програми WorkMaster Рис. 3.3 – Модельні спектри ^{137}Cs от напівпровідникового детектора: “ідеальний” (а), с розрахунками (б) розширений (в). Таблиця 3.1 – Результати обробки модельних спектрів. Рис.4.1 – Основне вікно Тренажера для вибору режиму запуску. Рис.4.2 – Вікно введення пароля в режимі Адміністратор. Рис.4.3 – Основне вікно програми WorkMaster із списком практичних завдань. Рис.4.4 – Основне вікно програми WorkMaster з повчальними відеороликами. Рис.4.5 – Підготовка лабораторних завдань. Модуль "Схема даних" Рис.4.6 Схема розрахунку шаблонів спектрів Рис.4.7 – Вибір детектора. Рис.4.8 – Вибір коліматора Рис.4.9 – Вибір аналізатора. Рис.4.10 – Розраховуємо функцію відгуку детектора Рис.4.11 – Ідеальний фотонний спектр: а – утворений вільним ядром; б – випущений матеріалом зразка; в – утворений у результаті взаємодії в детектуючому середовищі. Рис.4.12 – Вибираємо потрібний детектор Рис.4.13 – Розраховуємо відгук детектора Рис.4.14 – Розрахунок матриць відгуку Рис.4.15 – Вибираємо детектор Рис.4.16 – Вибираємо аналізатор Рис.4.17 – Розраховуємо фізичний спектр Рис.4.18 – Завантажуємо детектор для фізичного спектру Рис.4.19 – Завантажуємо коліматор для фізичного спектру Рис.4.20 – Завантажуємо зразок і розраховуємо фізичний спектр Рис.4.21 – Генерація енергетичного розподілу ізотопів Рис.4.22 – Генеруємо шаблони спектрів Рис.4.23 – Вибираємо матрицю відгуку Рис. 4.24 – Вибираємо фізичний спектр Рис. 4.25 – Вибираємо джерело Рис. 4.26 – Спектр Th-232 Рис. 4.27 – Спектр ізотопів Ra-226, Th-232, K-40, Cs-137 Рис. 4.28 – Спектр ізотопів Ra-222, Rn-220, K-40, Ra-223 Рис. 4.29 – Спектр ізотопів I-125, U-

230, Na-22 Рис.5.1 Бібліотекою Nuclide із 497 нуклідів Рис.5.2 Пропорції цезія Cs-137 Рис.5.3 Радіонукліди цезія Cs-137 Рис.5.4 Пропорції стронція Sr-90 Рис.5.5 Радіонукліди стронція Sr-90

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Герасимов О.І. д.ф.-м.н.,проф.	27.04.20	01.04.20
2		04.05.20	11.05.20
3		13.05.20	22.05.20
4		25.05.20	29.05.20
5		01.06.20	10.06.20

7. Дата видачі завдання 27.04.2020

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Огляд новітніх літературних джерел за темою дипломного проекту	27.04. – 04.05.20	85	4 добре
2	Узагальнення основних теоретичних положень проекту	05.05.- 10.05.20	85	4 добре
3	Рубіжна атестація	11- 16.05.20р	85	4 добре
4	Узагальнення отриманих результатів. Оформлення електронної версії роботи. Перевірка на плагіат. Складання протоколу та авторського договору	17.05.20р 08.06.20	85	4 добре
5	Підготовка паперової версії і презентаційного матеріалу до процедури предзахисту. Внесення коректив. Рецензування роботи. Підготовка до публічного захисту.	09.06.20 14.06.20	85	4 добре
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		85	4 добре

Студент Алієва А. Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи Співак А.Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

«Ідентифікація радіонуклідного вмісту промислової продукції за допомогою віртуального γ - спектрометра «ГаммаЛаб»

Актуальність теми. Тема роботи присвячена питанням обґрунтування використання спектрометричного комплексу «Гамма-лаб».

Навчальний комплекс «Гамма-лаб» розвиває навички роботи з небезпечними радіоактивними речовинами, уміння визначати ці речовини по їх спектрам. Ці навички важливі для проведення дистанційних вимірів (наприклад для сильно радіоактивних елементів, об'єктів космосу).

Мета роботи – перегляд відповідних програм, а також створення нових шаблонів джерел з різними ізотопами і їх сумішей в різних пропорціях, що дозволяє нам розширити базу «Гамма-лаб».

Мета дослідження. Новизна роботи полягає у перегляді методики використання комплексу «Гамма-лаб» в умовах навчального процесу в Одеському державному екологічному університеті, яка б дозволила уникнути потреби в реальних джерелах ІВ при роботі із спектрами радіоактивних речовин.

Об'єкт дослідження. Новітні методи гамма-спектрометричну лабораторію

Предмет дослідження. GammaLab, інтерактивна програма RadDecay.

Задачі дослідження:

- розглянути гамма-спектрометричну лабораторію;
- проаналізувати
- розглянути;
- розглянути (запропонувати)

Ключові слова: gammalab, радіоекологія, ізотопи, raddecay

Науковий керівник: ст.викл. Співак А.Я.

Робота містить:

Сторінок – 77

Таблиць – 1

Рисунків – 44

Кількість формул – 4

Літературних посилань – 6

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ОПИС GAMMALAB.....	10
1.1 Структура і можливості програмного комплексу.....	10
1.2 Моделювання апаратурних гамма-спектрів в реальному часі.....	13
2 ПРАКТИЧНІ ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЕМУЛЯЦІЇ ГАММА-СПЕКТРІВ.....	16
2.1 Калібрувальні процедури.....	16
2.2 Тестування програм обробки гамма-спектрів.....	18
2.3 Процес навчання.....	18
3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ В УМОВАХ БАЗИ «ГАММА-ЛАБ» НА КАФЕДРІ ЗАГАЛЬНОЇ ТА ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ.....	20
3.1 Можливості «Гамма-лаб».....	20
3.2 Основні принципи «Гамма-лаб»	20
3.3 Принципи моделювання спектрів ,структура і логіка побудови системи Гамма-лаб,її базові інформаційні і програмні компоненти	21
3.4 Розробки на основі інтегрованої програмно-інформаційної системи «Гамма-лаб».....	23
3.5 Додаткові можливості комплексу «Гамма-лаб».....	29
4 РЕКОМЕНДАЦІЇ, ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ «ГАММА-ЛАБ» У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС.....	34
4.1 Можливості «Схеми даних».....	36
4.2 Розрахунок шаблонів гамма-спектрів	38
4.3 Створення нових шаблонів спектрів.....	38
4.4 Створення нових зразків.....	41
5 СТРУКТУРА І МОЖЛИВОСТІ REDDECAY.....	64
5.1 Структура і можливості RadDecay.....	64

5.2	Опис ядерно фізичних властивостей цезія Cs -137.....	66
5.3	Опис ядерно фізичних властивостей стронція Sr-90.....	71
	ВИСНОВКИ.....	76
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	77

ВСТУП

У статті представлений програмний комплекс GammaLab, призначений для моделювання в реальному часі апаратурних гамма-спектрів напівпровідникових і сцинтиляційних детекторів при вимірах широкого набору джерел, що мають довільну просторову конфігурацію і радіонуклідної склад. Комплекс може використовуватися в якості симулятора для навчання роботі з спектрометричними пристроями та програмним забезпеченням, щоб уникнути витрат на покупку дорогого устаткування і організацію робіт з джерелами іонізуючого випромінювання. З його допомогою можуть вирішуватися завдання калібрування апаратури, а також тестування програмного забезпечення та методик вимірювання у випадках, коли атестовані джерела випромінювання з заданими властивостями (розмірами, фізико-хімічними характеристиками, радіонуклідних складом) відсутні, або їх виготовлення вимагає значних витрат. Для вирішення перерахованих вище завдань GammaLab дозволяє створювати "гамма-спектрометричну лабораторію" з віртуальними детекторами і джерелами.

1 ОПИС GAMMALAB

1.1 Структура і можливості програмного комплексу

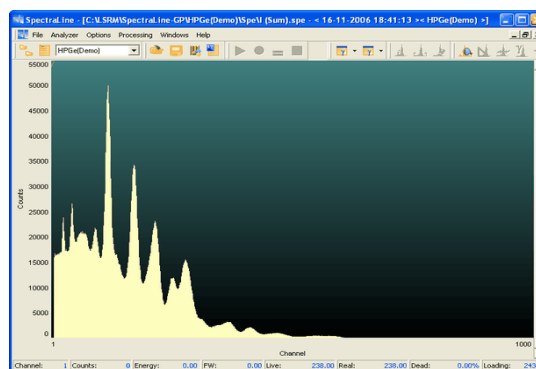
Комплекс GammaLab являє собою набір програмних модулів і баз даних, що працюють під управлінням єдиної графічної оболонки. На рис.1.1 показана функціональна схема GammaLab із зазначенням призначення основних програмних одиниць, що входять до його складу. За допомогою GammaLab можуть моделюватися гамма-спектри для напівпровідникових і сцинтиляційних детекторів. Передбачені ситуації, коли для зниження рівня зовнішнього фону або вхідний завантаження детектори розташовуються в спеціальних захисних коліматорі. При моделюванні використовуються реалістичні моделі детекторів і коліматоров, схематично показані на рис.1.2 і 1.3 відповідно. Спеціально розроблена графічна оболонка дозволяє задавати геометричні розміри і матеріали конструкційних елементів детектора і коліматора. Як матеріали може задаватися довільна суміш хімічних елементів і сполук.

За допомогою GammaLab можуть проводитися розрахунки модельних гамма-спектрів, як для точкових, так і об'ємних циліндричних джерел випромінювання. Є можливість розгляду важливих з точки зору практики ситуацій розташування джерела в багатошаровому захисному контейнері. Як і в разі детектора і коліматора, спеціальна графічна оболонка дозволяє уточнити геометричні розміри і матеріали джерела і оболонок контейнера. На рис.4 наведено кілька прикладів імітації розташування точкового гамма-джерела в реальних транспортних контейнерах[1].

Розрахунок функції відгуку детектора

Отримання матриці відгуку детектора на основі його функції відгуку і параметрів аналізатора

Розрахунок квазіфізичні спектри Монолінії



Отримання шаблону апаратного спектра для джерела з довільним радіонуклідним складом

Емуляція спектра в реальному часі в залежності від положення джерела і детектора

Передача спектра в штатну програму спектрометра

Рис.1.1 Функціональна схема комплексу GammaLab

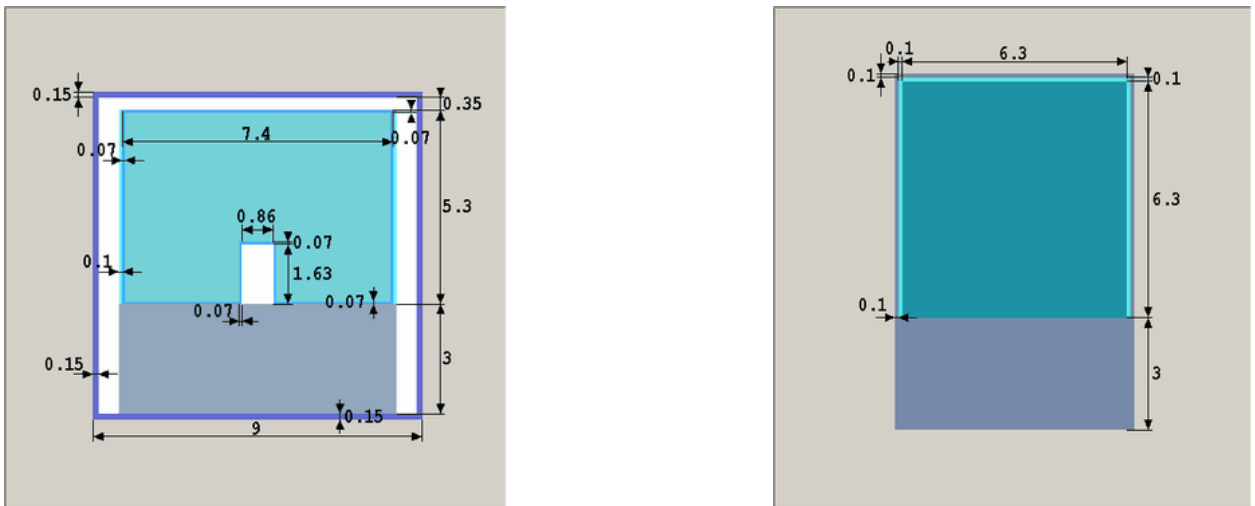


Рис.1.2 HPGe коаксіальний (зліва) і сцинтиляційний (праворуч) детектори

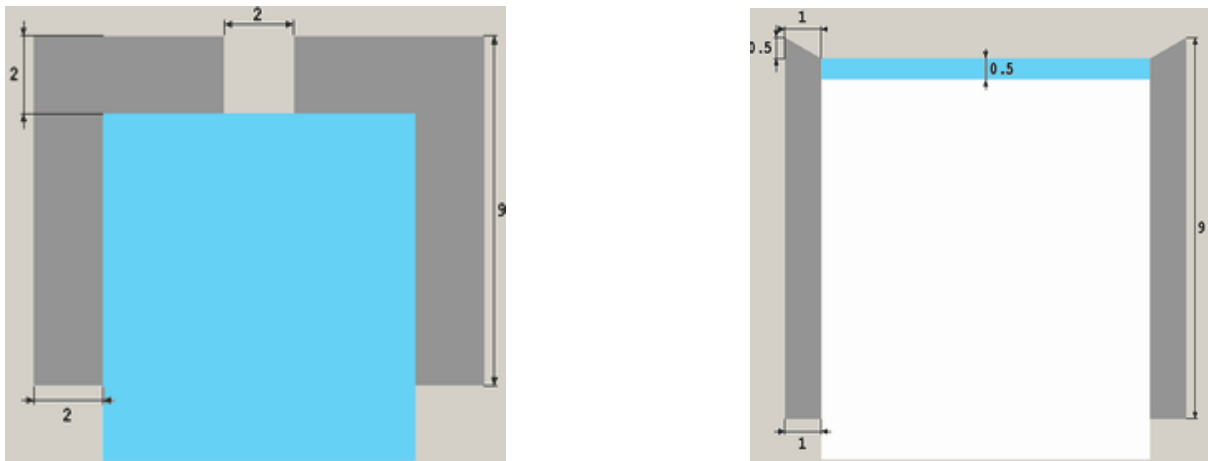


Рис.1.3 Моделі коліimatorов: зліва - коліimator для захисту від навколишнього фону, праворуч – коліimator для зниження вхідного завантаження в разі вимірювання високоактивних зразків

Процес моделювання гамма-спектрів за допомогою GammaLab складається з двох етапів. На першому етапі генеруються так звані шаблони спектрів - набір гамма-спектрів, розрахованих для даного радіонуклідного складу джерела випромінювання і даної геометрії вимірювання, що включає геометрію джерела, контейнера, детектора і коліатора. Шаблони розраховуються для сукупності точок простору навколо джерела і набору орієнтацій детектора в кожній такій точці. Також враховуються

характеристики енергетичної шкали і енергетичного дозволу віртуального гамма-спектрометра.

На другому етапі на основі отриманих шаблонів проводиться моделювання гамма-спектра в реальному часі для конкретного розташування і взаємної орієнтації детектора і джерела з відображенням процесу набору спектра в штатній спектрометричній програмі (SpectraLine).

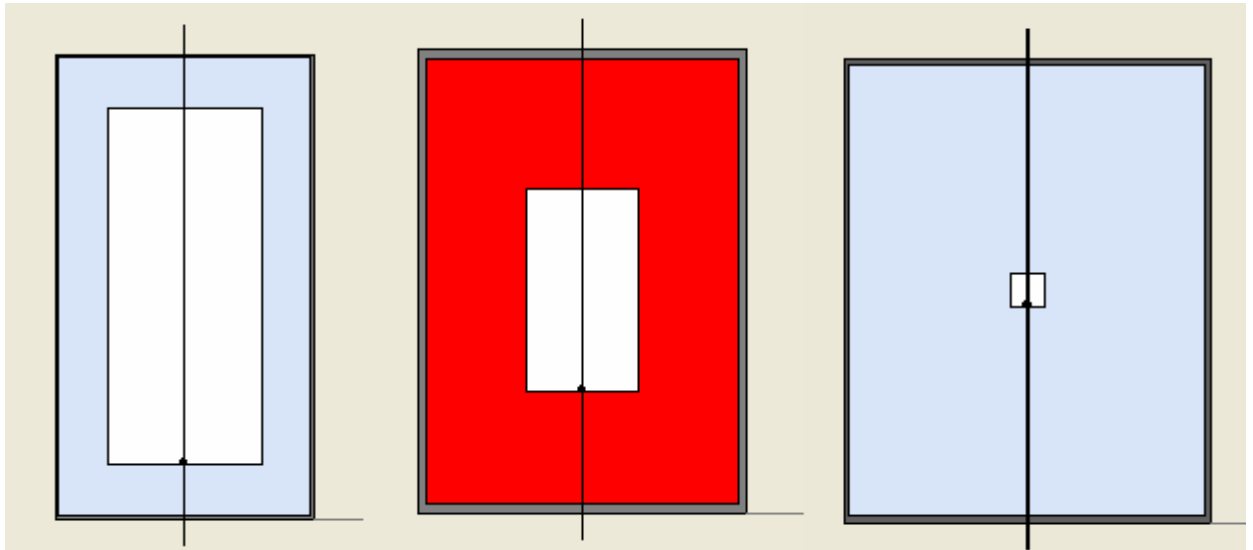


Рис.1.4 Схематичні зображення контейнерів КТ1-10, КІЗ-0.5 і КТ 1-0.3 \ 0090 з точковим гамма-джерелом

1.2 Моделювання апаратурних гамма-спектрів в реальному часі

Для моделювання апаратурних спектрів в реальному часі використовується алгоритм швидкого моделювання, який полягає в перенормування розрахованих шаблонів з урахуванням конкретного положення і орієнтації спектрометра щодо джерела випромінювання. Оскільки в загальному випадку вони відрізняються від положення і орієнтації спектрометра, для яких були проведені розрахунки, застосовується спеціальна процедура інтерполяції і перенормировки шаблонів. Перенормування полягає в обліку фактичного відстані між джерелом і детектором, а також оцінці відносної частини видимої поверхні джерела при

заданому положенні і орієнтації спектрометра з урахуванням області видимості використовуваного коллиматора.

Процес генерації апаратурного спектра в реальному часі схематично показаний на рис.1.6. На макеті робочого місця оператора відображаються детектор і вимірюваний джерело (один або кілька). Тривимірна графіка дозволяє оператору імітувати переміщення детектора і джерел, а також задавати зручну орієнтацію робочого столу. Після генерації "ідеального" апаратурного спектра за допомогою описаного вище алгоритму швидкого моделювання, він перетвориться в "реальний", що враховує умови проведення вимірювань і поточний стан апаратури. Розроблені алгоритми генерації "реального" спектра дозволяють імітувати статистичний процес накопичення спектру, вплив навколишнього радіаційного фону (в тому числі і від інших джерел), а також стан апаратури і відповідні апаратурні ефекти (розширення піків, зрушення піків, шуми електроніки, прорахунки) в залежності від завантаження, часу прогріву апаратури і наявності / відсутності високої напруги. Отриманий "реальний" спектр передається в штатну програму спектрометра з використанням протоколу передачі спектрометричних даних у вікно аналізатора, реалізований за допомогою засобів операційної системи (технологія відкритого інтерфейсу). На Рис. 1.7 показаний процес емуляції набору спектра джерел Cs-137 в контейнері КТ1-10 і Cs-137 в контейнері КТ1-5 сцинтиляційним детектором.

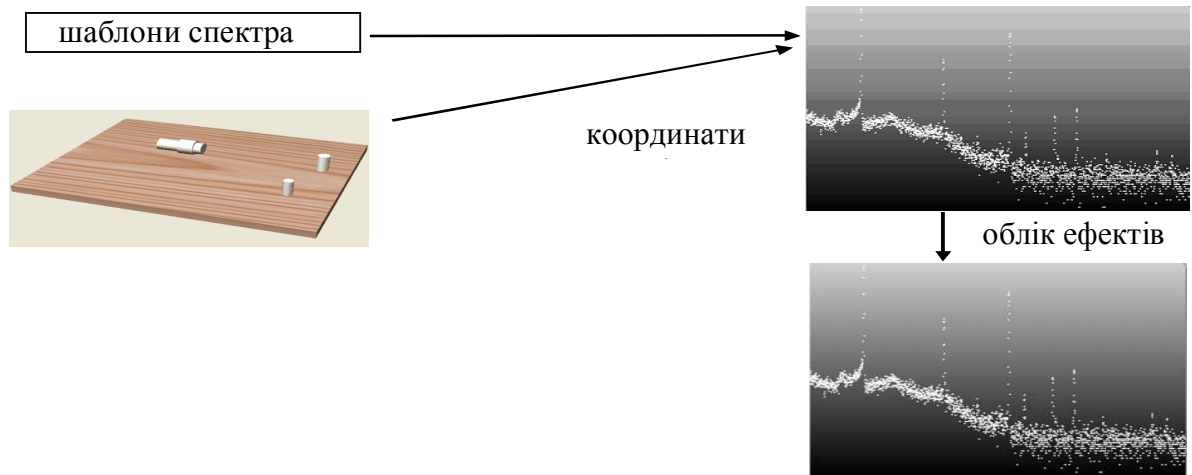


Рис.1.5 Схема моделювання апаратних спектрів в реальному часі

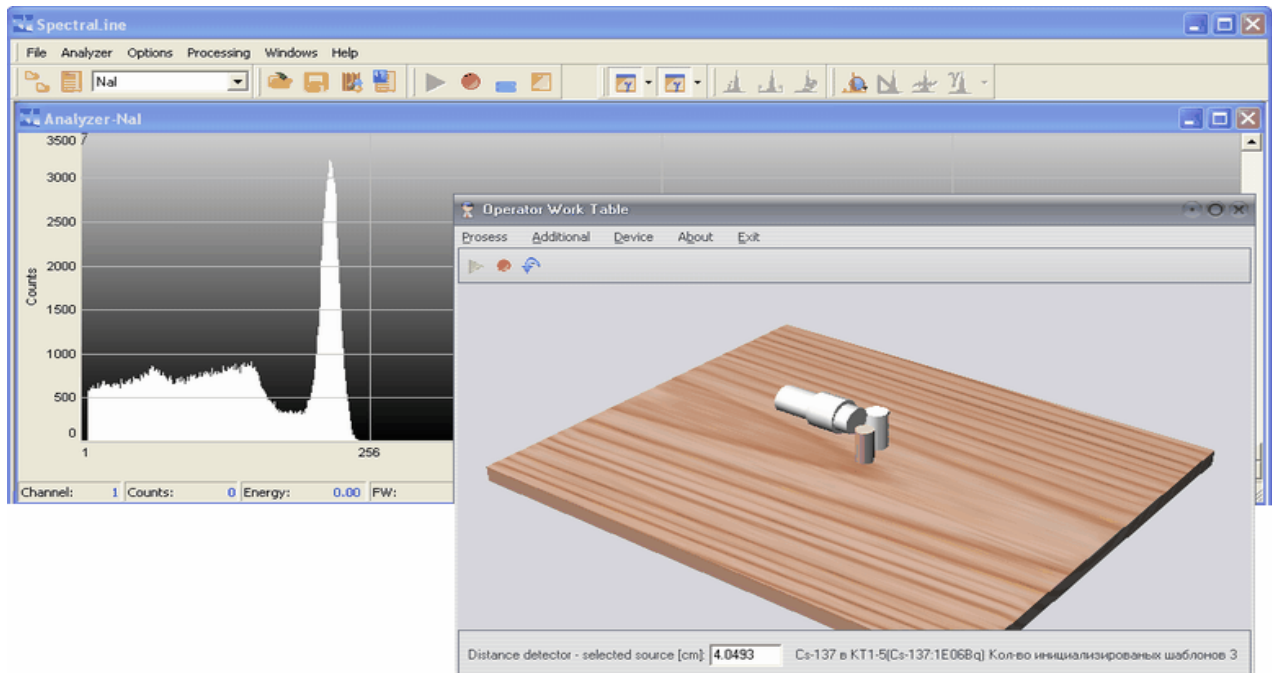


Рис.1.6 Емуляція спектра джерела Cs-137 в режимі реального часу

2 ПРАКТИЧНІ ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЕМУЛЯЦІЇ ГАММА-СПЕКТРІВ

2.1 Калібрувальні процедури

Моделювання апаратурних гамма-спектрів представляється особливо перспективним при аналізі складних гамма-спектрів, що вимагають знання функції відгуку детектора в широкому діапазоні енергій. Така потреба виникає при застосуванні методів обробки спектрів, що використовують повну форму лінії, або при обробці безперервних гамма-спектрів. При аналізі сцинтиляційних спектрів істотну роль грає також правильне опис комптонівського розподілу, форму якого важко однозначно оцінювати за вимірюваним спектру. Важливе практичне застосування модельних спектрів пов'язане з використанням методу обробки на основі еталонних гамма-спектрів. Експериментальне отримання еталонних спектрів для ряду важливих прикладних задач практично неможливо. Зокрема, це стосується гамма-спектрів для окремих радіонуклідів, що знаходяться в ланцюжку розпадів. У ряді випадків важко отримати еталонні спектри для чистих радіонуклідів, особливо короткоживучих, наприклад, ізотопів йоду. Все це сильно обмежує можливості методу еталонних спектрів. Слід підкреслити, що отримання функції відгуку детектора в широкому діапазоні енергій представляє не тривіальну експериментальну задачу. Перш за все це пов'язано з тим, що число прийнятних для цілей калібрування радіонуклідів, що мають умовно моноенергетичного випромінювання - обмежена (це добре відомі джерела з набору ОСГИ -Am-241, Ce -139, Hg-203, Sn-113, Cs-137, Mn-54, Zn-115), а отримання функцій відгуку з використанням многореперних джерел вимагає застосування складних інтерполяційних процедур, які вносять додаткову невизначеність. У той же час, розрахунок функцій відгуку і отримання еталонних спектрів можливо із застосуванням програмного комплексу GammaLab. Це, однак, вимагає

застосування верифіцированої математичної моделі детектора, для чого необхідна розробка спеціальної процедури. Як приклад на рис. 2.1 представлений набір функцій відгуку в діапазоні 300-2500 кеВ для випадку точкового джерела і сцинтиляційного спектрометра на основі кристала NaI (63x63мм). На рис.2.2 наведено модельний апаратний спектр радіонукліда Eu-152 в порівнянні з реальним спектром, отриманим для цього ж детектора[2].

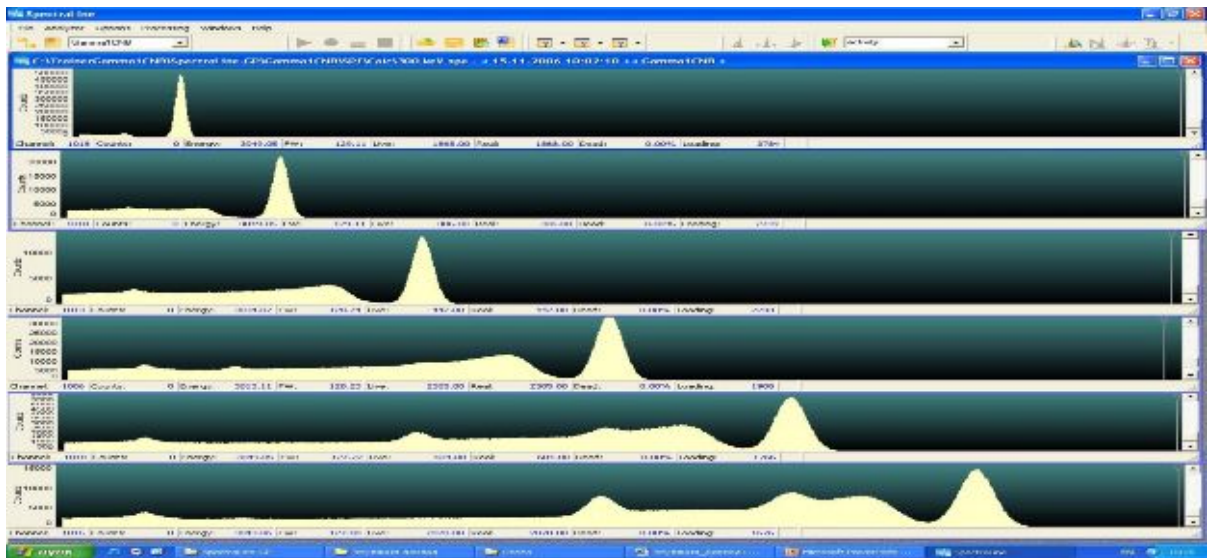


Рис.2.1 Функції відгуку для детектора на основі кристала NaI (63x63 мм), розраховані за допомогою програмного комплексу GammaLab

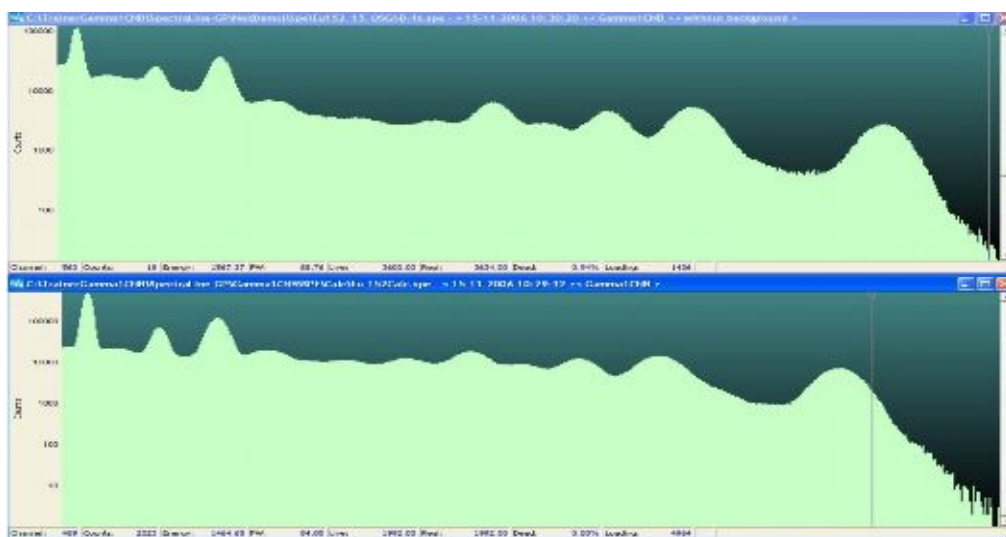


Рис.2.2 Модельний і реальний спектри Eu-152

2.2 Тестування програм обробки гамма-спектрів

Практично важливою областю застосування пакета GammaLab, може, мабуть, бути тестування методів, алгоритмів і програм обробки лінійчатих гамма-спектрів. Традиційний підхід до тестування має ряд недоліків, серед яких:

- Потрібна наявність стандартних сертифікованих калібрувальних зразків із заданим радіонуклідним складом і властивостями матриці.
- Результати тестування часто залежать від вибору апаратури, так як на вимірний гамма спектр накладаються неконтрольовані апаратурні ефекти.

У той же час, за допомогою пакета GammaLab можна підготувати набір тестових спектрів для різних джерел, типів детекторів і умов вимірювання. Застосування таких спектрів для цілей тестування програм обробки має ряд очевидних переваг:

- Модельні спектри позбавлені неконтрольованих апаратурних ефектів. З іншого боку ці ефекти можуть бути накладені контрольованим чином.
- Можуть бути змодельовані спектри для джерел з довільним точно заданим радіонуклідним складом і активністю, чого не можна сказати про реальні зразках.
- Однаковий можуть бути отримані як калібрувальні спектри, так і спектри вимірюваних зразків з потрібними властивостями (щільність, матеріал)[2].

2.3 Процес навчання

Програмний комплекс GammaLab може використовуватися для навчання роботі з спектрометричними пристроями. До складу комплексу входить програмна оболонка WorkMaster, призначена для формування та виконання завдань в режимі адміністратора або оператора. Завдання являє

собой запис, що містить перелік зразків і їх початкові координати на робочому столі, демонстраційний відеоролик і коментарі.

В режимі адміністратора WorkMaster дозволяє створювати нові завдання, доповнюючи або змінюючи базу шаблонів гамма-спектрів. У режимі оператора із запропонованого списку вибирається існуюче завдання, після чого відображається робочий стіл і запускається штатна програма спектрометра. Після запуску аналізатора в режимі реального часу емулюється набір спектра. Приклад роботи GammaLab в режимі навчання для випадку точкового джерела Th-232 і напівпровідникового детектора представлений на рис.2.3.

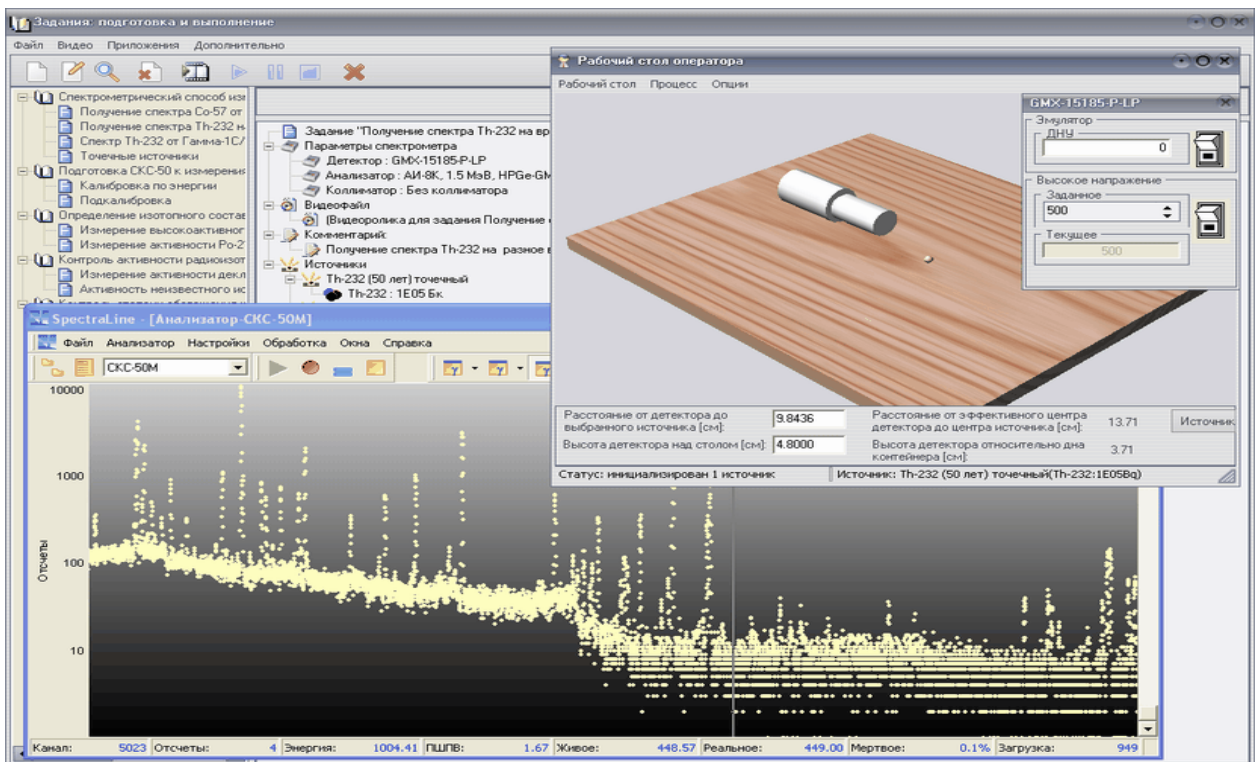


Рис.2.3 Оболонка програми WorkMaster

3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ В УМОВАХ БАЗИ «ГАММА-ЛАБ» НА КАФЕДРІ ЗАГАЛЬНОЇ ТА ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ

3.1 Можливості «Гамма-лаб»

Моделювання гамма-спектрів точкових і об'ємних джерел, у тому числі в захисних контейнерах, різними типами детекторів.

Інтегрована програмно-інформаційна система для моделювання гамма-спектрометричних вимірів (отримання модельних спектрів за різних умов проведення експерименту).

Служить повчальним комплексом для моделювання експериментів в режимі реального часу на основі інтегрованої програмно-інформаційної системи.

Розробка методів розрахунку даних, необхідних при проведенні спектрометричного аналізу експериментальної інформації (ефективності реєстрації, параметрів радіоактивного розпаду радіонуклідів, поправочних коефіцієнтів для корекції ефекту істинного підсумовування каскадних гамма-квантов), на основі інформаційних і програмних ресурсів системи, а також створення методики обробки експериментальних даних з урахуванням особливостей форми апаратної лінії гамма-спектрометра.

Дослідження можливостей застосування гамма-детекторів на основі стислого ксенону для вирішення завдань ідентифікації складного радіонуклідного складу з використанням інтегрованої програмно-інформаційної системи для моделювання експериментів[3].

3.2 Основні принципи «Гамма-лаб»

Схема швидкого моделювання гамма-спектрів джерел довільного радіонуклідного складу на основі даних, заздалегідь розрахованих з використанням методу Монте-Карло.

Реалізована інтегрована програмно-інформаційна система для моделювання гамма-спектрометричних експериментів з детекторами різних типів і довільним набором радіоактивних джерел (точкових або об'ємних, твердих, рідких, газоподібних, в захисних контейнерах) з урахуванням умов виміру.

Повчальний Тренажер-емулятор дозволяє моделювання вимірів джерел за допомогою напівпровідникових і сцинтиляційних детекторів в режимі реального часу на основі інформаційних і програмних ресурсів системи.

Використовується програмний комплекс "Нуклід Майстер" для отримання даних, необхідних для спектрометричного аналізу: ефективності реєстрації, параметрів радіоактивного розпаду, поправочних коефіцієнтів для корекції ефекту істинного підсумовування [3].

3.3 Принципи моделювання спектрів, структура і логіка побудови системи

Гаммалаб, її базові інформаційні і програмні компоненти

Найбільш загальний зв'язок між природним спектром, що описується функцією $\varphi(E)$, і апаратним спектром $\psi(E')$ дається інтегральним рівнянням Фредгольма 1-го роду

$$\psi(E') = \int K(E, E')\varphi(E)dE. \quad (3.1)$$

Ядро рівняння $K(E, E')$ дає вірогідність того, що частинка з істинною енергією E реєструватиметься приладом як частка з енергією E' .

Припустивши, що у разі монохроматичного випромінювання з енергією E_0 ядро $K(E_0, E')$ може бути представлене як сверток компонентів, що описують фізичний спектр і його розширення під впливом апаратних ефектів, можна представити функцію відгуку детектора на монохроматичне випромінювання як помножену на ефективність реєстрації $\eta(E_0)$ свертку функції $D(E_0, E)$, що описує вірогідність передачі чутливому об'єму

детектора енергії E , при попаданні в нього частки з енергією E_0 , і функції для обліку енергетичного дозволу спектрометра $G(E, E')$.

$$K(E_0, E') = \eta(E_0) \int_0^{E_0} D(E_0, E) G(E, E') dE. \quad (3.2)$$

Оскільки кожна з функцій D , G , η залежить від кутового і просторового розподілу реєстрованого випромінювання, вводиться оцінка по взаємодії для визначення вкладу в сумарний потік тих часток, які провзаємодіяли в чутливому об'ємі детектора. Ця оцінка визначається таким чином:

$$\Gamma = \frac{1}{2} |\cos \theta| A \phi (1 - \exp(-\mu L)), \quad (3.3)$$

Де θ (– кут між напрямом руху частки і внутрішньою нормаллю до поверхні чутливого об'єму детектора в точці їх перетину x_d ; L – довжина відрізка, кінці якого є точками перетину напрямку руху частки з поверхнею чутливого об'єму детектора (відрізок знаходиться усередині чутливого об'єму); μ – лінійний коефіцієнт поглинання для матеріалу чутливого об'єму детектора і енергії фотона, що падає; A – площа поверхні чутливого об'єму; ϕ – потік в точці x_d .

Оцінка по взаємодії дозволяє уніфікувати функції D і використовувати їх для розрахунку апаратурних спектрів різних джерел випромінювання і геометрії виміру, що істотно спрощує загальну схему розрахунку апаратурних розподілів.

Моделювання гамма-спектрометричних вимірів полягає в розрахунку спектру випромінювання джерела, у тому числі в захисному контейнері, в точці розташування детектора, його перетворенні з урахуванням апаратурних ефектів, і передачі в зовнішню програму для відображення і подальшої обробки. Підхід, що розглядається в цій роботі, полягає у використанні матриць відгуку детектора і т.з. "зразка" (геометрія виміру) на монохроматичне випромінювання.

Методом Монте-Карло один раз розраховується набір універсальних, не залежних від кутового і просторового розподілу реєстрованого

випромінювання функцій відгуку детектора на монохроматичне випромінювання. Тоді апаратурний спектр джерела є її свертку з розрахованим фізичним спектром в точці розташування детектора.

Для "зразка" на сітці енергій методом Монте-Карло розраховується фізичний спектр моноенергетичного випромінювання. Фізичний спектр заданого радіонуклідного складу можна представити як суперпозицію спектрів моноліній відповідно до інтенсивностей ліній випромінювання джерела. Використання такого підходу дозволяє розрахувати один раз набір фізичних спектрів моноліній на сітці енергій в конкретній геометрії (наприклад, для контейнера з потрібними параметрами), а потім проводити досить швидкі за часом операції інтерполяції і суперпозиції використання даних по параметрах радіоактивного розпаду для отримання фізичного спектру конкретного джерела.

Таким чином, процедура отримання апаратурного спектру складається з наступних етапів (рис. 3.1):

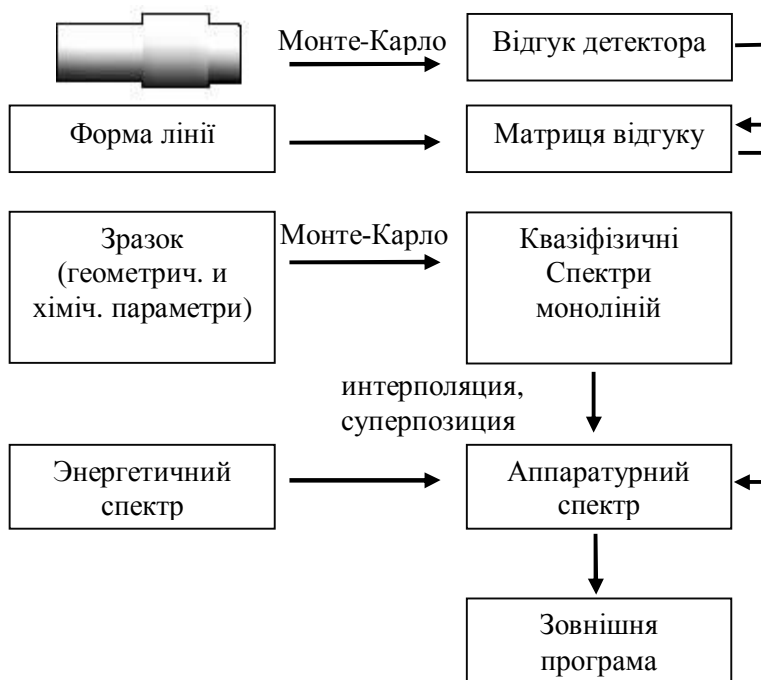


Рис. 3.1 – Коротка схема моделювання

1. Побудова методом Монте-Карло функції відгуку на моноенергетичне випромінювання для моделі детектора.

2. Розрахунок матриці відгуку детектора на енергетичній сітці.

3. Побудова методом Монте-Карло квазіфізичних спектрів моноліній для заданого

діапазону енергій гамма-випромінювання, енергетичної сітки і набору точок розташування спектрометра і його орієнтацій відносно джерела.

4. Суперпозиція квазіфічних спектрів моноліній відповідно до інтенсивностей ліній випромінювання джерела для отримання сумарного спектру, які далі згортаються з матрицею відгуку детектора.

Оскільки розрахунки методом Монте-Карло займають тривалий час, в системі передбачена процедура швидкого моделювання спектру, яка використовує заздалегідь отримані шаблони – набір апаратурних гамма-спектрів, змодельованих для заданого радіонуклідного складу джерела випромінювання і геометрії виміру для сукупності точок простору навколо джерела і набору орієнтацій детектора в кожній такій точці.

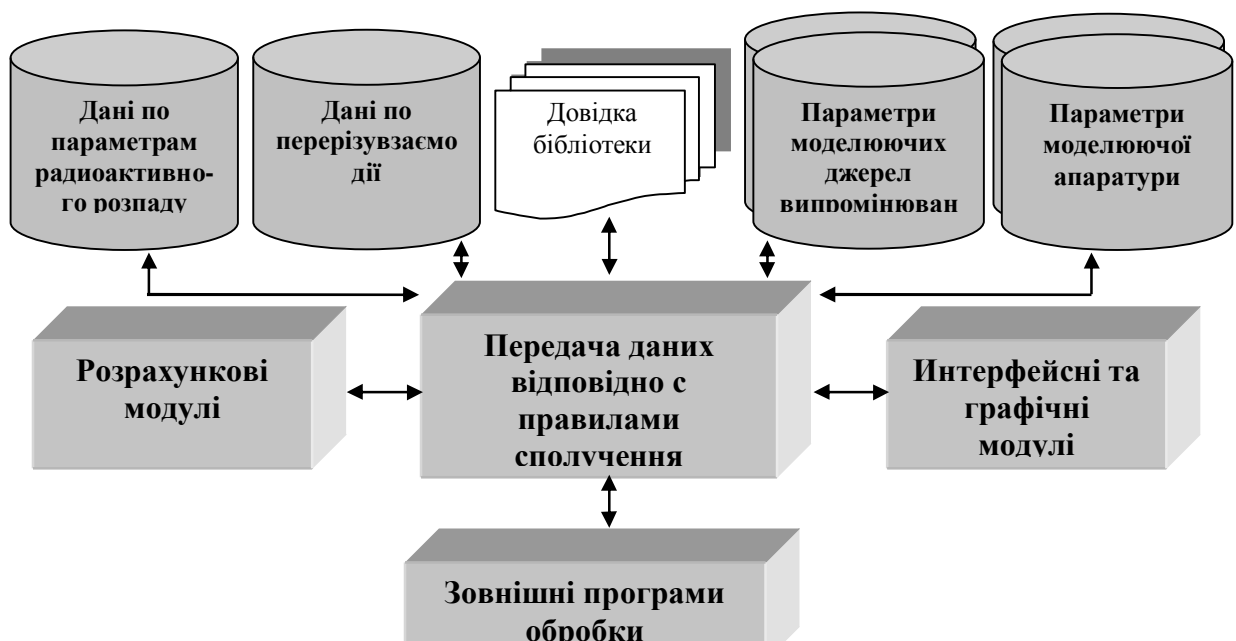


Рис. 3.2 – Загальна схема побудови системи «ГаммаЛаб»

Основними складовими системи є (рис. 3.2) :

- Базы і бібліотеки ядерно-фізических даних (по радіоактивних розпадах на основі ENSDF, перерізам взаємодії гамма-випромінювання з речовиною XCOM);
- Базы даних для зберігання моделей джерел випромінювання і апаратури (в т.ч. окрема база цих "зразків"), графічні оболонки для завдання параметрів;

- Розрахункові і інтерфейсні модулі для реалізації моделювання спектрів і / або інших алгоритмів, відповідно до поставленого завдання, а також додаткові довідкові бібліотеки;
- Зовнішні програми обробки, які підтримують відкритий протокол передачі спектрометричної інформації.

Розрахункові алгоритми, інтерфейсні і графічні застосування входять до складу системи у вигляді окремих модулів, які підключаються з урахуванням правил сполучення:

- визначені формати їх вхідних і вихідних даних, службових файлів;
- доступ до інформаційних ресурсів здійснюється через спеціальну бібліотеку функцій, що дозволяє замінювати і додавати необхідні довідкові дані;
- розроблений відкритий протокол представлення і передачі спектрометричної інформації.

Загальна схема моделювання гамма-спектрометрических вимірів, що розглядається в цій роботі, складається з трьох етапів:

1. Розробка і збереження в базах цих моделей джерел випромінювання і апаратури.
2. Генерація шаблонів апаратурних гамма-спектрів.
3. Моделювання спектру в режимі реального часу для конкретного розташування і взаємної орієнтації детектора і джерела і передача даних в зовнішню програму.

У роботі розглядаються точкові і об'ємні циліндричні зразки, у тому числі і в багатошарових захисних контейнерах. Для зручності інтерфейсу об'ємні зразки підрозділяються на тверді і рідкі/газоподібні. Крім того, окремо виділені уранові і плутонієві зразки, активність яких визначається матеріалом зразка. Моделі джерел, що випускають випромінювання заданого радіонуклідного складу, описують геометричні параметри зразка, матеріал, форму, розміри, наявність захисного контейнера і його геометричні

параметри для наступного обліку поглинання при проходженні через шари матеріалу.

Моделі апаратури, реєструючої випромінювання, включають детектори (напівпровідникові і сцинтиляційні), аналізатори, коліматори різних типів з можливістю завдання розмірів і матеріалів основних конструкційних елементів [4].

3.4 Розробки на основі інтегрованої програмно-інформаційної системи "Гаммалаб"

Для відробітку практичних питань застосування гамма-спектрометрів СКС-50М і Гамма-1С/NB1 створений електронний Тренажер-емулятор. Він є пакетом методичного і програмного забезпечення, що дозволяє організувати і коригувати процес навчання.

Для реалістичнішого відтворення гамма-спектрометричних експериментів в процедуру моделювання доданий ще один етап – генерація "реального" апаратурного спектру, який враховує апаратурні ефекти (розширення піків, зрушення піків, шуми електроніки, прорахунки) залежно від завантаження, часу прогрівання апаратури і наявності/відсутності високої напруги.

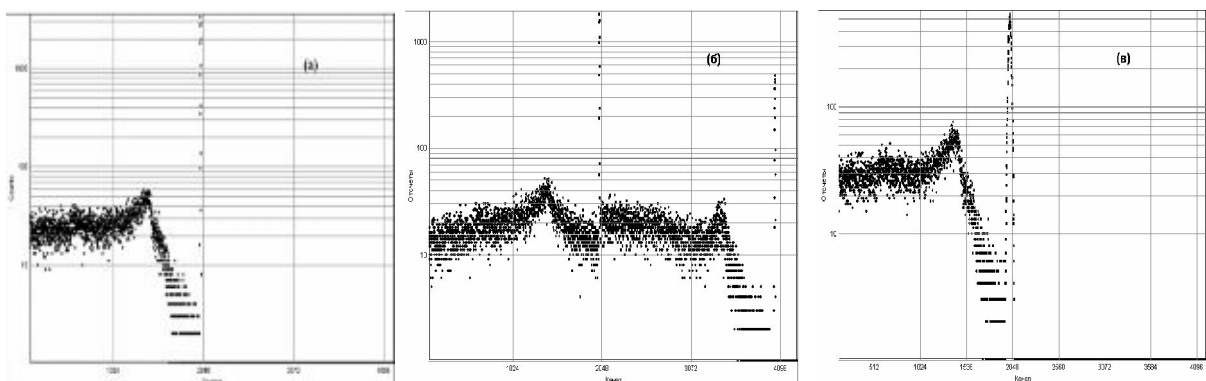


Рис. 3.3 – Модельні спектри ^{137}Cs от напівпровідникового детектора: "ідеальний" (а), с розрахунками (б) розширених (в).

Процедура перевірки полягала в порівнянні експериментальних даних від конкретних детекторів з результатами моделювання з використанням

Тренажера. У таблиці 3.1 приведені результати обробки модельних спектрів, які демонструють збіг в межах погрішностей розрахованих активностей з їх паспортними значеннями.

Іншим застосуванням, створеним на основі програмних і інформаційних ресурсів системи "Гаммалаб", є комплекс "Нуклід Майстер". Він розроблений для отримання параметрів радіоактивного розпаду, обліку ефекту істинного підсумовування каскадних гамма-квантов при обробці спектрів, розрахунку ефективності реєстрації і створення призначених для користувача бібліотек радіонуклідів.

Таблиця 3.1 – Результати обробки модельних спектрів

Джерело	Пасп. , А, кБк	Гамма-1С/NB1				СКС-50М			
		Експеримент		Модель		Експеримент		Модель	
		А, кБк	$\delta(A,$ %)	А, кБк	$\delta(A,$ %)	А, кБк	$\delta(A,$ %	А, кБк	$\delta(A,$ %
точкові джерела									
^{60}Co	197,6	206	8	210	9	200	2,7	203	1,8
^{134}Cs	95,1	98	7	99	6	89,9	1,7	92,8	1,3
^{152}Eu	243,6	250	11	258	4	236,2	1,4	243,7	1
точкові джерела в захисних контейнерах									
^{60}Co в КТІ-5	197,6	203	10	200	6	182	7	188	4
^{60}Co в КТІ-10	197,6	200	11	204	7	184	8	189	7
^{60}Co в КТІ-20	197,6	190	14	205	8	197	8	193	4
^{134}Cs в КТІ-5	95,1	96	9	95	6	90	4	85	4
^{134}Cs в КТІ-10	95,1	107	10	99	6	91	5	86	4
^{134}Cs в КТІ-20	95,1	105	17	100	7	90	4	91	4
^{152}Eu в КТІ-5	243,6	260	15	245	10	222	2	232	2
^{152}Eu в КТІ-10	243,6	250	17	244	10	240	2,2	239	2,2
^{152}Eu в КТІ-20	243,6	260	23	254	11	240	2,8	239	2,7

Ефект істинного підсумовування проявляється в так званих каскадних переходах і обумовлений підсумовуванням імпульсів, що утворюються в результаті одночасної реєстрації декількох каскадних γ -квантів в чутливому об'ємі детектора. Оскільки час життя ядерних рівнів звичайно значно менше тривалості імпульсів на виході детектора, в детекторі реєструється тільки сумарна енергія каскадних гамма-променів, а не енергія кожного окремого γ -ванта. Ці події призводять до спотворення γ -спектру вимірюваного джерела: до збільшення або зменшення площ піків повного поглинання або до появи помилкових піків суми з енергіями, які відсутні в істинному спектрі джерела випромінювання.

Поправочний коефіцієнт для корекції ефекту істинного підсумовування визначається як відношення неспотвореної площі піку повного поглинання $S_{true}(E)$ до експериментально визначеної, спотвореної процесом істинного підсумовування $S_{ap}(E)$:

$$C(E) = S_{true}(E) / S_{ap}(E) \quad (3.4)$$

У цій роботі для розрахунку ефективності реєстрації і поправочних коефіцієнтів створений динамічно зв'язуваний модуль (DLL) TccfCalc (True Coincidence Correction Factors CALCulation). Розрахунок проводиться методом Монте-Карло з використанням оцінених ядерних даних ENSDF для довільних γ -випромінюючих радіонуклідів при вимірах точкових і об'ємних джерел (посудина Маринелли, циліндрична кювета) із застосуванням детекторів різних типів (коаксіальні, широкодіапазонні і колодязні напівпровідникові, а також сцинтиляційні). Транспорт фотонів робиться з урахуванням основних типів взаємодії гамма-випромінювання з речовиною. Перерізи взаємодії фотонів розраховуються на основі даних бібліотеки XCOM. Дані ENSDF доповнюються виходами квантів характеристичного випромінювання K- і L-серій.

Реалізована схема розрахунку окрім γ - γ збігів враховує кореляцію γ - випромінювання з анігіляційними квантами, супроводжуваними (+-распад, і рентгенівськими квантами K- і L-серій, що виникають внаслідок ефектів

внутрішньої конверсії і К-захвата. Крім того, враховуються анізотропія кутової кореляції каскадних γ -квантов. Функції кутових кореляцій γ -излучення розраховуються теоретично на основі інформації про спини ядерних станів, що беруть участь, а також мультипольностях і параметрах змішування тих, що відповідають γ -переходів.

Для вирішення завдання обліку ефекту істинного підсумовування каскадних гамма-квантов розроблені і проінтегровані в програмно-інформаційну систему:

1. Графічна оболонка GMaster для завдання параметрів моделей джерела і детектора.
2. DLL-модуль TscfCalc для розрахунку ефективності реєстрації і поправочних коефіцієнтів.
3. DLL-модуль CorrectLib для корекції інтенсивностей гамма-випромінювання в бібліотеці радіонуклідів.

Перевірка результатів, отриманих з використанням модуля TscfCalc, проводилася шляхом порівняння з наявними експериментальними даними і розрахунками інших авторів [4].

3.5 Додаткові можливості комплексу «Гамма-лаб»

Враховуючи додаткові можливості програми, у відкритому вікні ліній спектру можна здійснювати обробку даного спектру. Можливість виконання наступних дій:

- пошук піків і підгонка;
- пошук піків;
- підгонка;
- підгонка по всьому спектру;
- відняти фон;
- калібрування по енергії;
- калібрування по напівширини;

- калібрування по піку-зразком;
- первинна калібрування;
- калібрування по ефективності;
- активність радіонуклідів;
- розрахунок активності; зовнішні програми;
- розрахунок активності (еталонні спектри).

Одна з унікальних можливостей цієї системи це виконання зовнішніх програм.

Розглянемо декілька задач на прикладі програми «Матлаб»:

Задача 1.

До штабу МНС, який знаходиться у місті Одеса, надійшла інформація, що у результаті позапроектної аварії на реакторі РБМК-1000 відбувся викид у атмосферу суміші радіоактивних ізотопів Кг, Хе, І. У атмосферу потрапило біля 1% загального змісту інертних газів, що знаходились у активній зоні реактору. Аварія виникла при таких метеорологічних та місцевих умовах:

- відстань від реактору до міста Одеса=90км;
- час аварії 21.00, літо;
- хмарність - 4 бали;
- опадів немає;
- ефективна висота викиду $h=100\text{м}$;
- коефіцієнт шорсткості поверхні $z=10\text{см}$;
- середня швидкість вітру на висоті 10м $u=2,5\text{м/с}$;
- напрямок вітру – на місто О;
- коефіцієнт екранування будовами $K=0,4$;
- попередня кампанія реактору $T=3$ роки.

Необхідно дати оцінку іонізуючого випромінювання, яке супроводжує радіоактивний розпад ізотопів Кг, Хе, І.

Розрахувати питому активність суміші ізотопів Кг, Хе, І. Як впливають метеорологічні фактори на розповсюдження радіоактивного забруднення.

Розрахувати еквівалентну дозу, яку отримує доросле населення та діти при досягненні радіоактивною хмарою міста Одеса, враховуючи при цьому, час пересування хмари від реактора до міста, функцію виснажування радіоактивної хмари, коефіцієнт метеорологічного розбавлення.

Практична частина (розрахунки):

1. З урахування того, що відбувся викид лише 1% інертних газів, то знаходимо повну активність в м. Одеса $=12,02$. Так як приземна об'ємна активність буде визначатися перш за все ізотопами I, які можуть осідати з хмари, то знаходимо її $A_v=12.42 \cdot 10^8 \text{Бкс/м}^3$.
2. Вih визначаємо по таблиці оснований на нормативних даних НРБУ. Визначаємо дозовий коефіцієнт Bsh.
3. На основі розрахованих коефіцієнтів визначаємо потужність еквівалентної дози на щитовидну залозу за весь час існування джерела I - Hd.
4. Знаходимо очікувану еквівалентну дозу за дві неділі Hs. Знаходимо очікувану поглинуту дозу HH.

Користуємося програмою «Матлаб» та вводимо необхідні дані.

clear all

clear all

global t Tef V Bih Qo G Av Bsh Hs Hd HH lam x u sz

%G=1.7e-6;

Qo=12.06e14;

t=14;

Tef=7.6;

lam=0.5e-2;

x=100;

u=5;

sz=100;

h=100;

V=0.54;

```

x=0:1:2500;
Fx=exp(-lam*x./u);
G=(Fx/2/pi/0.04/432);%*exp(-h^2/(2*sz^2));
Bih=1.13e-5;
Bsh=V*Bih;
Av=Qo*G;
Hd=Av*Bsh;
Hs=Hd*(1-(0.693*(t/Tef)));
HH=Hd-Hs;
plot(x,HH,'b'),grid
XLABEL('Rasstoyanie,km')
YLABEL('Effektivnaya ekvivalenunaya doza,Zv')

```

Окрім отриманих результатів створюємо графік де вказана залежність ефективної еквівалентної дози від відстані (додаток А).

Задача 2

Міграція радіонуклідів в біосфері

Розрахувати об'ємну активність води в річці уздовж течії на відстані X км від джерела неперервного радіаційного забруднення. Знайти річну еквівалентну дозу H_t на організм дорослої людини, якщо добовий об'єм споживання води складає 4 л/добу і активність води не змінюється на протязі року. Початкова об'ємна активність води $A_{v0}=5 \cdot 10^5$ Бк/м³, швидкість річки u , константа осадження нуклідів b та константа розпаду λ .

Дані для програми:

```

clear all
%global u b l1 Av Bi v t Q G H V l2 A01 A02
clc
u=0.5;
b=0.5e-4;
l1=0.5e-5;
A01=500e5;

```



```
A02=700e5;
v=4;
Bi=2.9e-7;
t=3.16e7;
Q=19e11;
G=2e-8;
V=v*t;
Av=Q*G/t;
l2=0.5e-5;
x=0:0.1:2500;
A1=A01*exp(-(x./u)*(b+l1));
A2=A02*exp(-(x./u)*(b+l2));
plot(x,A1,'b'),grid
H=Av*Bi*v;
%,x,A2,'r'
```

4 РЕКОМЕНДАЦІЇ, ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ «ГАММА-ЛАБ» У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС

1. Програмний комплекс дозволяє проводити навчання відповідно до завдань, сформульованих в технічному завданні. Документ присвячений демонстрації роботи комплексу в режимі "Оператор".

При необхідності, у разі зміни учбової програми, наповнення комплексу може бути змінено в режимі "Адміністратор".

2. Загальний опис тренажера.

Тренажер складається з двох незалежних частин : тренажер для СКС-50(М); тренажер для Гамма-1С/НВ1.

Процес навчання має на увазі наявність користувача з правами адміністратора (викладача), що має доступ до ресурсів для формування розділів Тренажера. Інші користувачі – оператори (що навчаються) – виконують поставлені завдання. Відповідно до цього передбачено два режими роботи комплексу:

1. Режим Адміністратора дозволяє змінювати зміст Тренажера.
2. Режим Оператора призначений безпосередньо для навчання.

На рис. 4.1 наведено основне вікно Тренажера для вибору режиму запуску (Адміністратор або Оператор) і спектрометричного прилада (СКС-50(М) або Гамма-1С/НВ1).

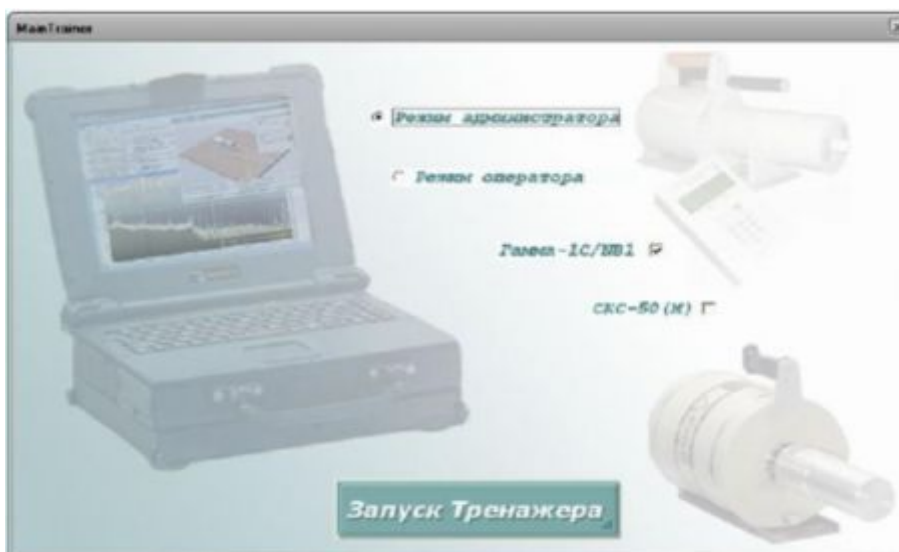


Рис.4.1 – Основне вікно Тренажера для вибору режиму запуску

Доступ до усіх ресурсів комплексу можливий тільки для користувача з правами Адміністратора, тому цей режим захищений паролем.

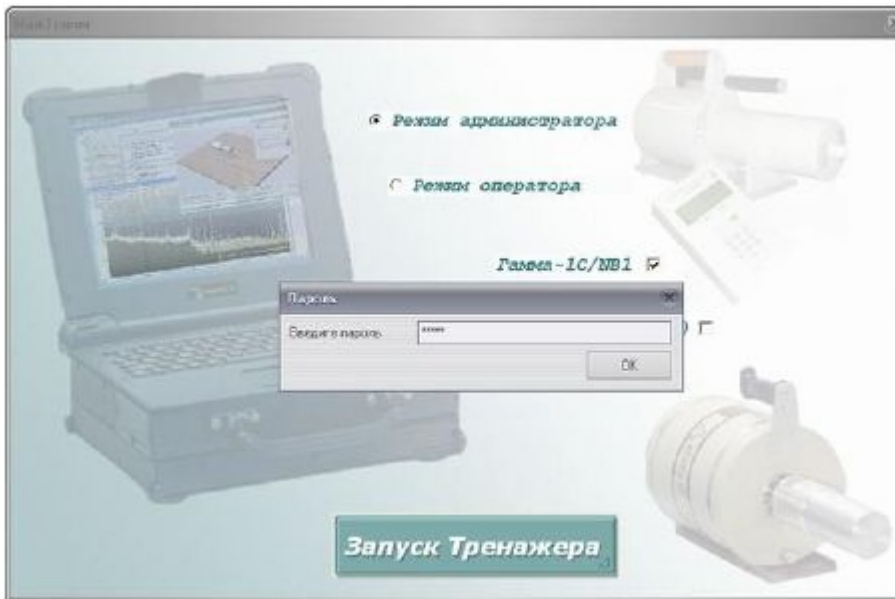


Рис.4.2 – Вікно введення пароля в режимі Адміністратор.

Програмна оболонка WorkMaster (Завдання: Підготовка і виконання) викликається при запуску Тренажера в режимі Адміністратора. З її допомогою користувач може:

- моделювати детектори, зразки і так далі, змінювати і видаляти вже існуючі,
- виконувати усі необхідні розрахунки по формуванню шаблонів спектрів,
- створювати нові лабораторні завдання,
- записувати і переглядати повчальні відеофільми,
- змінювати пароль для запуску комплексу в режимі Адміністратор,
- викликати будь-які модулі, що входять до його складу.

На Рис. 4.3 представлено основне вікно програми WorkMaster із списком практичних завдань для Гамма-1С/НВ1 (ліворуч) і параметрами одного з них (справа).

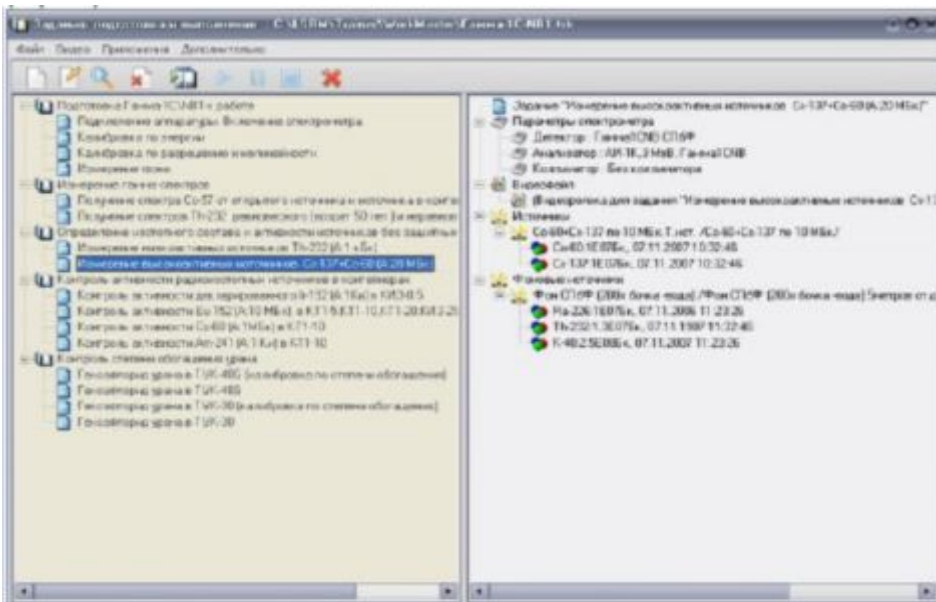


Рис.4.3 – Основне вікно програми WorkMaster із списком практичних завдань.

У програмну оболонку WorkMaster входить засіб для переглядання повчальних відеороликів, рис. 4.4.

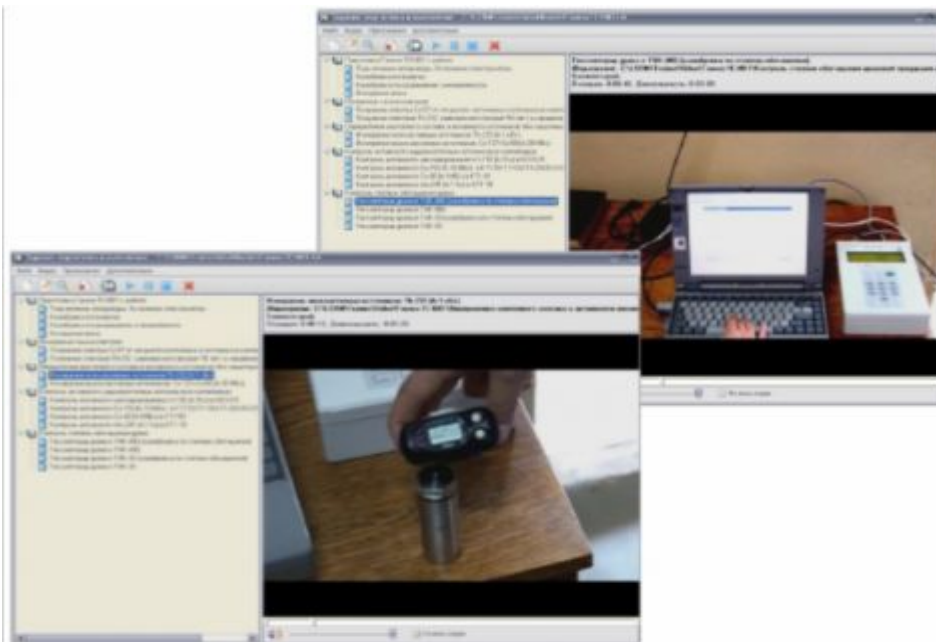


Рис.4.4 – Основне вікно програми WorkMaster з повчальними відеороликами.

4.1 Можливості "Схеми даних"

Спеціальний модуль "Схема даних" у складі інтегруючої оболонки WorkMaster. Доступ до нього має користувач з правами адміністратора.

Модуль "Схема даних" дозволяє :

- виконати послідовно, в режимі майстра, усі дії з підготовки шаблонів апаратурних спектрів для джерел з довільним радіонуклідним складом з можливістю перегляданню результатів на кожному етапі розрахунків;
- скопіювати квазіфізичні спектри з інших баз даних, наприклад, при установці комплексу «Гамма-лаб» на декілька комп' ютерів і розрахунку квазіфізичних спектрів для різних зразків;
- сформувати шаблони на основі експериментально отриманих даних;
- звернутися до будь-якого програмного модуля;
- отримати дані з будь-якої бази (проглянути параметри детекторів, аналізаторів, зразків і так далі; додати нові, змінити або видалити існуючі; перевірити наявність квазіфізичного спектру для конкретного детектора, коліматора і зразка;
- розрахувати шаблон і виконати моделювання спектру в режимі реального годині, змінюючи положення детектора і джерела на робочому столі, використовувати додаткову фільтрацію даних за типом зразка, контейнером і так далі) [4].

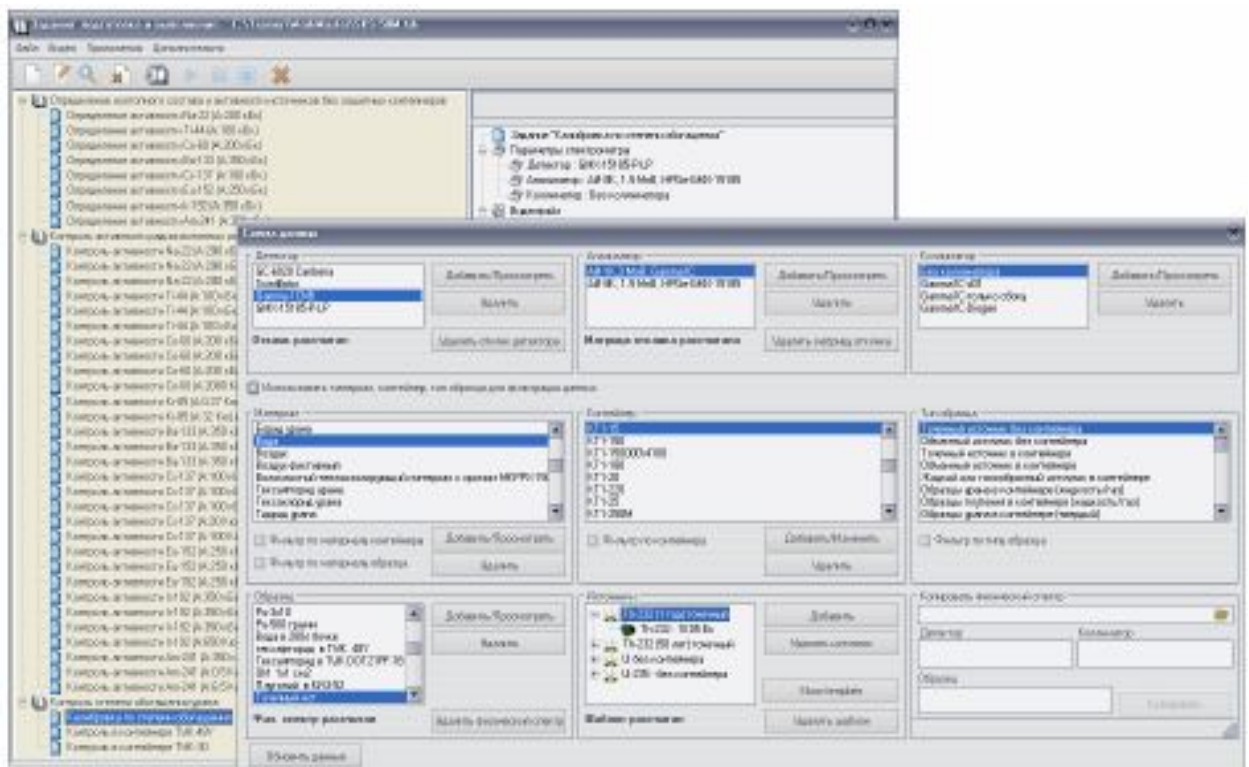


Рис.4.5 – Підготовка лабораторних завдань. Модуль "Схема даних"

4.2 Створення нових шаблонів спектрів

Найбільш простий спосіб поповнення шаблонів спектру – створення нових шаблонів спектрів для вже наявних в базі зразків, для яких розраховані фізичні спектри і для відповідного детектора розрахована матриця відгуку. Можна досить оперативно розрахувати шаблони для довільного радіонуклідного складу і активності, або для уранових і плутонієвих зразків для різної міри збагачення і ізотопного складу, відповідно.

Алгоритм створення шаблону джерела :

- 1) вибір детектора --> розрахунок функції відгуку детектора;
- 2) вибір аналізатора --> розрахунок матриць відгуку;
- 3) вибір коліматора;
- 4) вибір типу зразка;
- 5) вибір зразка;
- 6) вибір джерела --> розрахунок енергетичного розподілу --> розрахунок фізичного спектру.
- 7) створити завдання.

4.3 Розрахунок шаблонів гамма-спектрів

В основу методики розрахунку шаблонів покладено метод статистичних випробувань (метод Монте-Карло), як найбільш адекватний для вирішення даного завдання [2]. Застосована схема розрахунку схематично представлена на рис.1.5. Вона базується на оптимізованому підході [4], який дозволяє використовувати один і той же набір стандартизованих функцій відгуку детектора для моделювання спектрів від довільних джерел випромінювання.

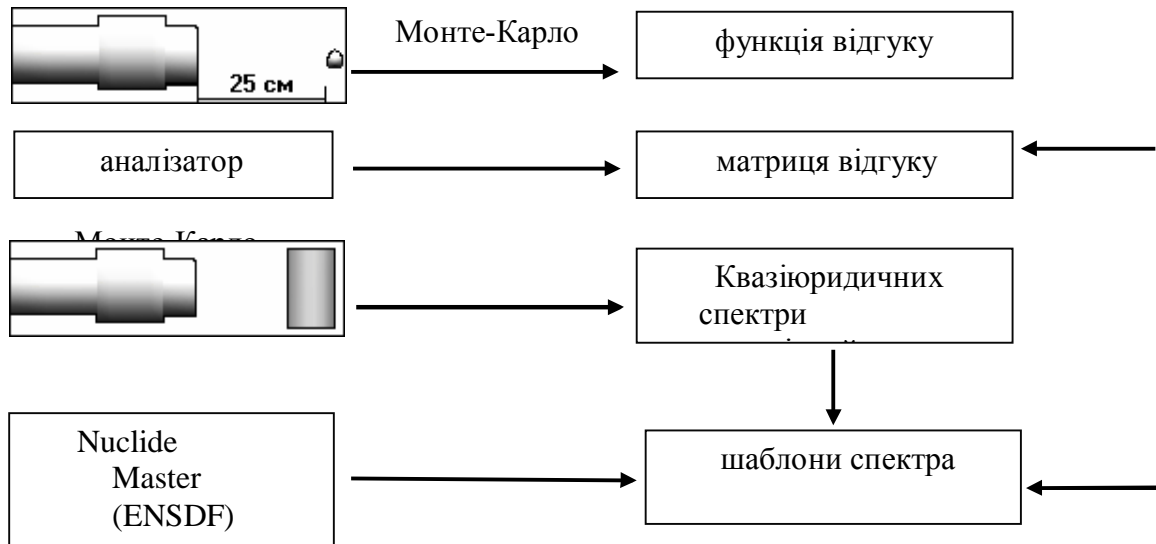


Рис.4.6 Схема розрахунку шаблонів спектрів

Спочатку з використанням імітаційної схеми Монте-Карло проводиться розрахунок нормалізованих функцій відгуку детектора для стандартизованої геометрії вимірювання - точкове джерело розташований на осі обертання детектора на відстані 25 см від його вхідного вікна. Функції відгуку розраховуються для заданого енергетичного діапазону (за замовчуванням 30 кеВ - 3 МеВ) і логарифмічною / лінійною сітки по енергії реєстрованих гамма-променів. У кожній розрахунковій точці функція відгуку являє собою сукупність ефективностей реєстрації по піку повного поглинання, піках одиночного і подвійного вильоту, піку 511 кеВ, піках вильоту рентгенівських характеристичних квантів, а також параметрів кусочно- безперервної полиномиальної апроксимації форми безперервного комптонівського розподілу. Транспорт фотонів проводиться з урахуванням основних типів взаємодії - когерентного розсіювання, фотоефекту, ефекту утворення пар і комптонівського розсіювання. Для прискорення розрахунків застосовується моделювання джерела по цінності, коли випускання гамма променів моделюється в межах тілесного кута детектора. На основі отриманих функцій відгуку і параметрів аналізатора (число каналів, ціна каналу і енергетичне дозвіл по лініях 122 кеВ і 1.33 МеВ)

розраховується матриця відгуку детектора з кроком по енергії, рівним енергетичної ціною каналу аналізатора.

Далі методом Монте-Карло розраховуються квазіфізическі спектри випромінювання для заданого діапазону енергій гамма-променів, для заданої енергетичної сітки і для заданого набору точок розташування спектрометра (детектор + коліматор) і його орієнтацій щодо джерела (контейнер + зразок). Квазіфізическі спектри являють собою згортку реального фізичного спектра випромінювання, що випускається контейнеризовано джерелом, і повної ефективності реєстрації детектуючої системи. Для збільшення ефективності моделювання використовується локальна оцінка потоку фотонів в місці розташування детектора (метод точкового детектора), при якому враховується внесок кожного фотона, випущеного джерелом, і кожного фотона, який зазнав взаємодія. При розрахунку спектрів для сильноекранірованих джерел додатково застосовується ще один метод зменшення дисперсії - т.зв. експоненціальне перетворення [1]. Квазіфізическі спектри в кожній розрахунковій точці, яка характеризується енергією гамма-променів, взаємним становищем і орієнтацією спектрометра і джерела, являють собою сукупність інтенсивностей прямого (нерозсіяного) випромінювання джерела, інтенсивностей анігіляційного випромінювання, а також параметрів кусочно-безперервною полиноміальною параметризацією безперервного розподілу розсіяних фотонів. Після закінчення Монте-Карлівський розрахунків з використанням розроблених процедур інтерполяції проводиться суперпозиція квазіфізическіх спектрів Монолінії відповідно до інтенсивностями ліній випромінювання джерела для отримання сумарного спектра. Інтенсивності ліній випромінювання розраховуються для заданої активності і радіонуклідного складу джерела на основі оригінальних даних бібліотеки оцінених ядерних даних по структурі ядра ENSDF, що містяться в пакеті NuclideMaster [1]. Отриманий сумарний квазіфізическі спектр далі згортається з матрицею відгуку детектора для отримання шаблону апаратного спектра для заданих параметрів

спектрометра (детектор + коліматор + аналізатор) і джерела (контейнер + зразок + радіонукліди). Дана процедура виконується для кожної розрахункової точки простору і кожної орієнтації детектора щодо джерела.

4.4 Створення нових зразків

У програмі закладені широкі можливості створення різних типів зразків джерел.

Як згадувалося раніше, щоб створити новий шаблон, потрібно задати йому певні характеристики. А також вибрати прилади для його реєстрації.

Першим кроком для створення шаблону є вибір детектора (рис.4.6), коліматора (рис.4.7) та аналізатора (рис. 4.8). Для детектора завдаються параметри:

- діаметр кристалу;
- висота кристалу;
- товщина відбивача;
- товщина упаковки;
- товщина ущільнювача;
- товщина розсіювача та ін.

Також враховується вибір матеріала кожного шару, цей вибір впливає на розрахунок.

Чутливий об'єм сцинтиляційного детектора є люмінесцентним матеріалом (твердий, рідкий або газоподібний), який "оглядається" приладом, реєструючим спалахи світла, викликані гамма-квантами; звичайно це фотоелектричний помножувач (фотопомножувач, ФЕУ). Сцинтиляційний матеріал може бути органічним або неорганічними; поширеніший останній. Прикладами органічних сцинтиляторів є антрацен, пластмаси і рідини. Два останніх є менш ефективними, ніж антрацен (еталон, з яким порівнюються усі інші сцинтилятори). Деякими із загальноприйнятих неорганічних сцинтиляційних матеріалів є йодид натрію (NaI), йодид цезію (CsI), сульфід

цинку (ZnS) і йодид літію (LiI). Найбільш традиційними сцинтиляційними детекторами являються тверді, а найбільш популярними – неорганічні кристали NaI і CsI. Новий сцинтиляційний матеріал германат вісмуту ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), що зазвичай означає як BGO, став популярним у випадках, коли його висока ефективність гамма-счета і його нижча чуттєвість до нейтронів переважають вимоги до енергетичного дозволу.

Коли гамма-кванти взаємодіють з матеріалом сцинтилятора, виникають іонізовані (збуджені) атоми в матеріалі сцинтилятора, які потім переходять в стан з нижчою енергією і випускають фотони світла. У чистому неорганічному кристалі сцинтилятора повернення атома в стан з нижчою енергією з випусканням фотона є малоефективним процесом. Крім того, фотони, що випускаються, зазвичай мають занадто високу енергію по відношенню до діапазону довжин хвиль, до яких чутливий ФЭУ. З метою збільшення випускання видимих фотонів до усіх сцинтиляторів додаються невеликі кількості домішок (званих активаторами). Фотони, що виникають при знятті збудження, проходячи крізь ці домішки добавляються до фотонів, які можуть активувати ФЭУ. Одним з важливих наслідків люмінесценції через домішки активатора є те, що об'єм кристала сцинтилятора стає прозорий для сцинтиляційного світла. Типовим прикладом активованого сцинтилятора, що зустрічається в гамма-вимірюваннях, є легований талієм йодид натрію NaI(Tl).

Сцинтиляційне світло випускається ізотропно, тому для мінімізації втрат світла сцинтилятор зазвичай оточується відбиваючим матеріалом (таким, як MgO) і потім оптично з'єднується з фотокатодом ФЭУ. Фотони сцинтиляції потрапляють на фотокатод і вивільняють електрони за допомогою фотоелектричного ефекту. Ці фотоелектрони потім прискорюються сильним електричним полем у ФЭУ. У міру того як фотоелектрони прискорюються, вони стикаються з електродами в трубці (званими динодами), вивільняючи додаткові електрони. Потім цей збільшений потік електронів знову прискорюється до зіткнення з наступними електродами, викликаючи сильне множення (з коефіцієнтом 10⁴ і більше) електронного потоку від його первинного значення на

поверхні фотокатода. Нарешті, посилений зарядовий імпульс прибуває на вихідний електрод (анод) трубки. Амплітуда цього імпульсу пропорційна первинній кількості заряду, звільненого на фотокатоді ФЭУ; постійна пропорційності є коефіцієнтом посилення ФЭУ. Крім того, згідно з природою фотоелектричного ефекту, первинне число фотоелектронів, звільнених на фотокатоді, пропорційно кількості світла, що падає на трубку фотопомножувача, яке, у свою чергу, пропорційно кількості енергії, втраченої в сцинтиляторі гамма-квантом (у припущенні відсутності втрат в об'ємі сцинтилятора). Таким чином утворюється вихідний сигнал, пропорційний енергії, втраченою гамма-квантом в сцинтилюючій середовищі. Проте, як обговорювалося вище, вимірний енергетичний спектр (навіть для моноенергетичного потоку фотонів) змінюється внаслідок впливу на нього фотоелектричного ефекту, комптонівського ефекту і різних явищ розсіяння в сцинтиляційному середовищі, а також в результаті статистичних флуктуації, пов'язаних з усіма цими процесами [4].

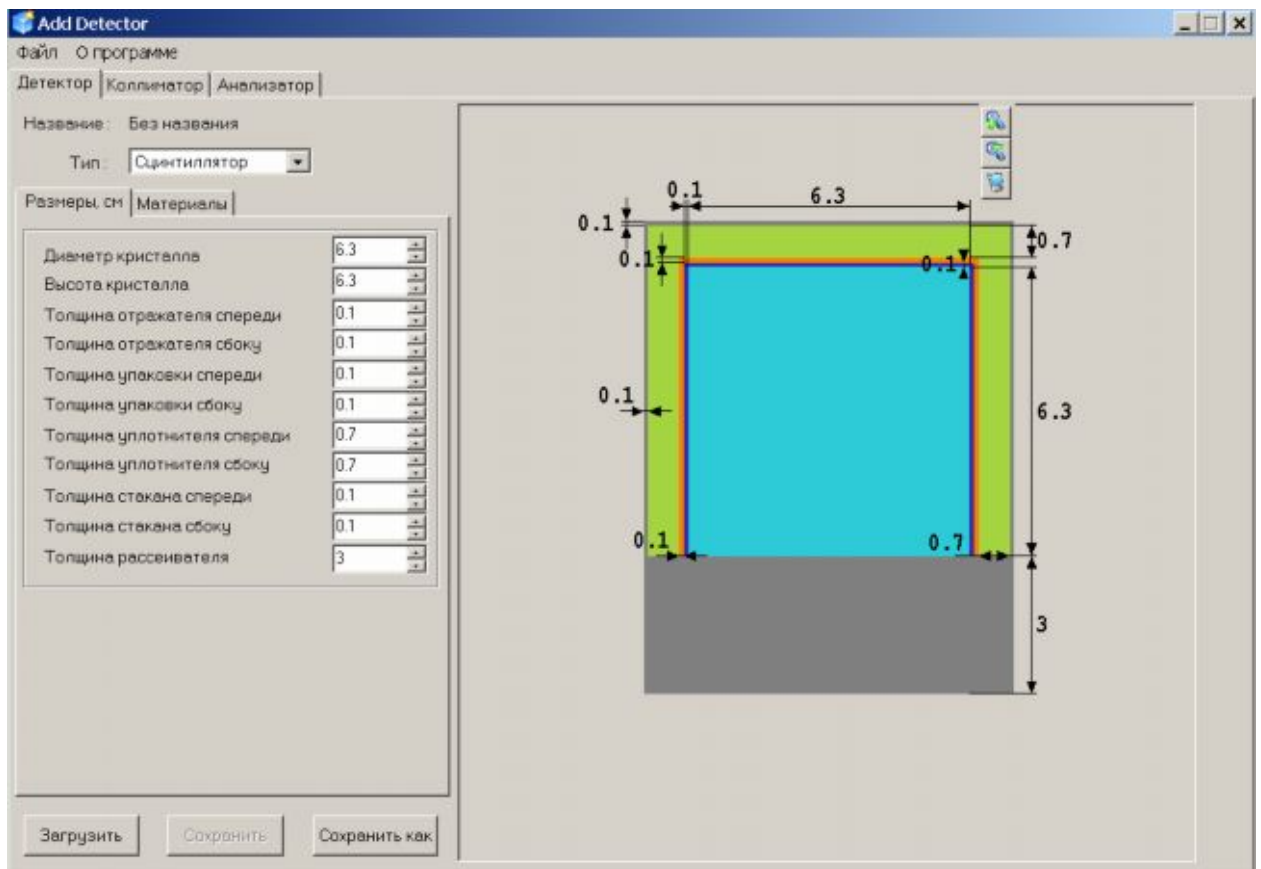


Рис.4.7 – Вибір детектора

При виборі коліматора враховується товщина та матеріал кожного шару, є декілька типів.

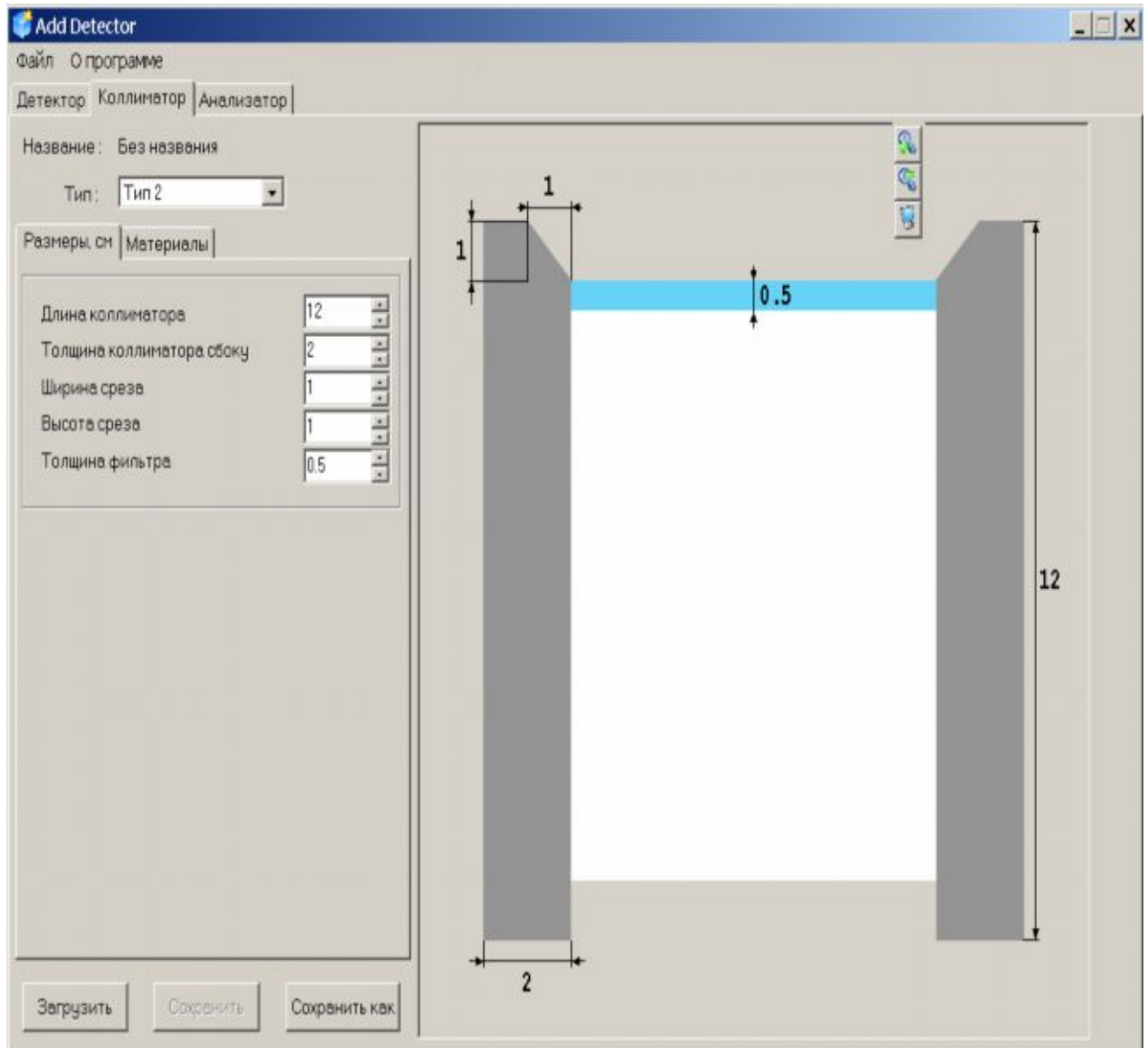


Рис.4.8 – Вибір коліматора

Вибираються параметри аналізатора . Задається ПШПВ по E_{γ} -152 (122 кеВ), Co -60 (1332 кеВ).

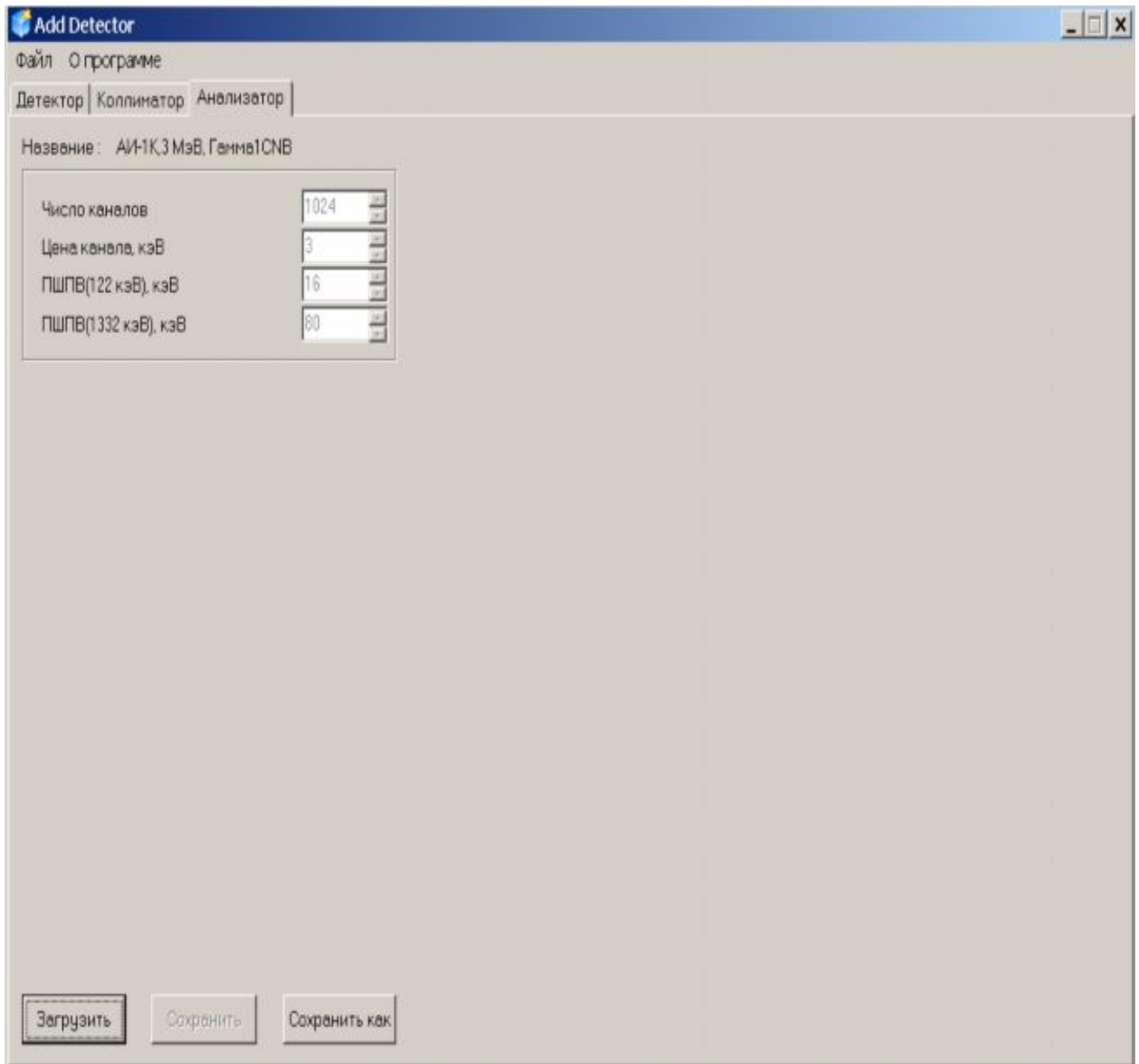


Рис.4.9 – Вибір аналізатора

Оскільки чутливість детектора залежить від енергії γ -квантів, то відгук детектора розраховується для різних значень E_γ у всьому інтервалі енергій (0...3MeV).

Розрахунок займає більше однієї години. Він проводиться у разі підключення нового детектора. Для вже існуючого потрібно просто вибрати його.

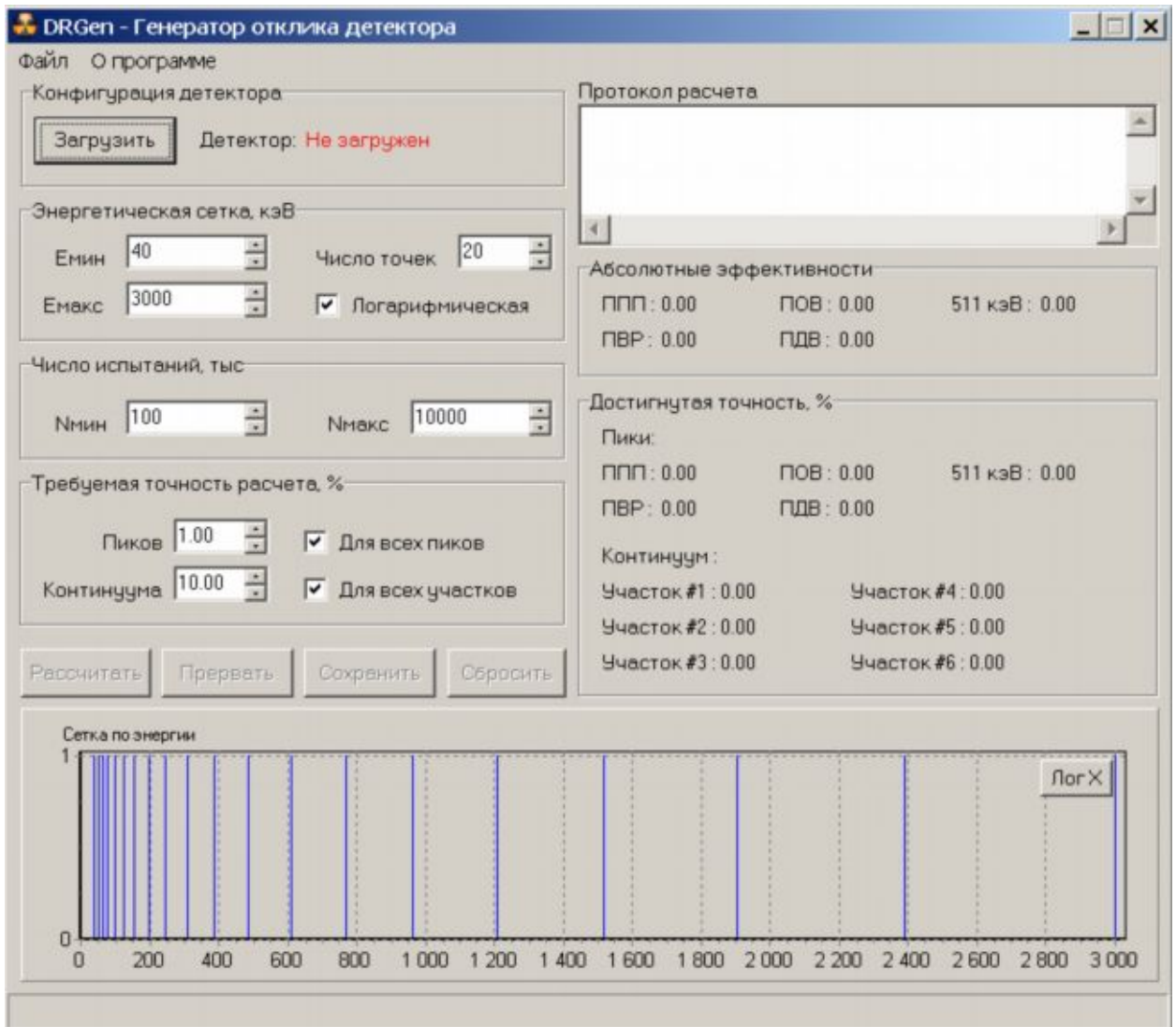


Рис.4.10 – Розраховуємо функцію відгуку детектора

Незалежно від типу використовуваного детектора, вимірні спектри мають багато спільних рис. Розглянемо спектр моноенергетичного джерела гамма-випромінювання з енергією E_0 , представлений на рис. 4.11 (а). Гамма-кванти виникають у ядерних переходах, які супроводжуються специфічними змінами енергії. Ці значення енергії відчувають незначні флуктуації внаслідок двох ефектів: 1 – квантових невизначеностей в енергіях переходів (так звана невизначеність Гейзенберга) і 2 – ефектів віддачі при випусканні фотонів гамма-випромінювання. Ці невизначеності є кінцевими, однак вони незначні в порівнянні з іншими ефектами енергетичного розширення спектру, обговорюваними нижче, і тому не показані на малюнку. Таким

чином, "ідеальний" спектр моноенергетичного гамма випромінення від вільнорозпадаючого ядра, по суті, являє собою гостру лінію при енергії E_0 .

Оскільки реєструються гамма-кванти зазвичай виходять не з вільного ядра, а випускаються ядерним матеріалом, частина з них піддається розсіюванню перед тим, як вони покинуть радіоактивний зразок. У результаті цього розсіяння піддалися йому фотони знаходять енергію трохи меншу, ніж E_0 , а енергетичний спектр фотонів, випущених із зразка матеріалу, злегка розширений в енергетичній області нижче E_0 , як показано на рис. 4.11 (б). Величина цього розширення зовсім невелика в порівнянні з іншими ефектами, що розглядаються нижче, і перебільшена на рис. 4.11(б), щоб привернути увагу до її існування. Слід також відзначити, що деякі гамма-кванти, покинувши зразок, були розпорошені зовнішніми матеріалами перед тим, як вони потраплять в детектор, і цей ефект може проявитися в остаточному енергетичному спектрі.

Коли гамма-квант потрапляє в детектуюче середовище, він передає частину або всю свою енергію атомного електрону, вивільняючи електрон з його атомної оболонки. Зазвичай цей звільнений електрон потім передає свою кінетичну енергію в серії зіткнень в детектуючому середовищі іншим атомним електронам.

Кількість енергії, необхідної для утворення пари електрон-іон в детектуючому середовищі, визначає повний заряд, який утворює вихідний імпульс. У фотоелектричному взаємодії вся енергія падаючого фотона передається фотоелектронів, який надалі викликає множинні іонізації до тих пір, поки його енергія не вичерпається. Отже, кількість заряду, утвореного в результаті події цього типу, пропорційно фактичній енергії фотона. У процесі рентгенівському розсіювання падаючий фотон передає іонізаційній електрону тільки частину своєї енергії. Згодом цього електрон викликає іонізації до тих пір, поки його енергія теж не витратиться. Кількість заряду, утвореного в результаті події цього типу, пропорційно частці енергії, спочатку втраченої падаючим фотоном, але не містить корисної інформації

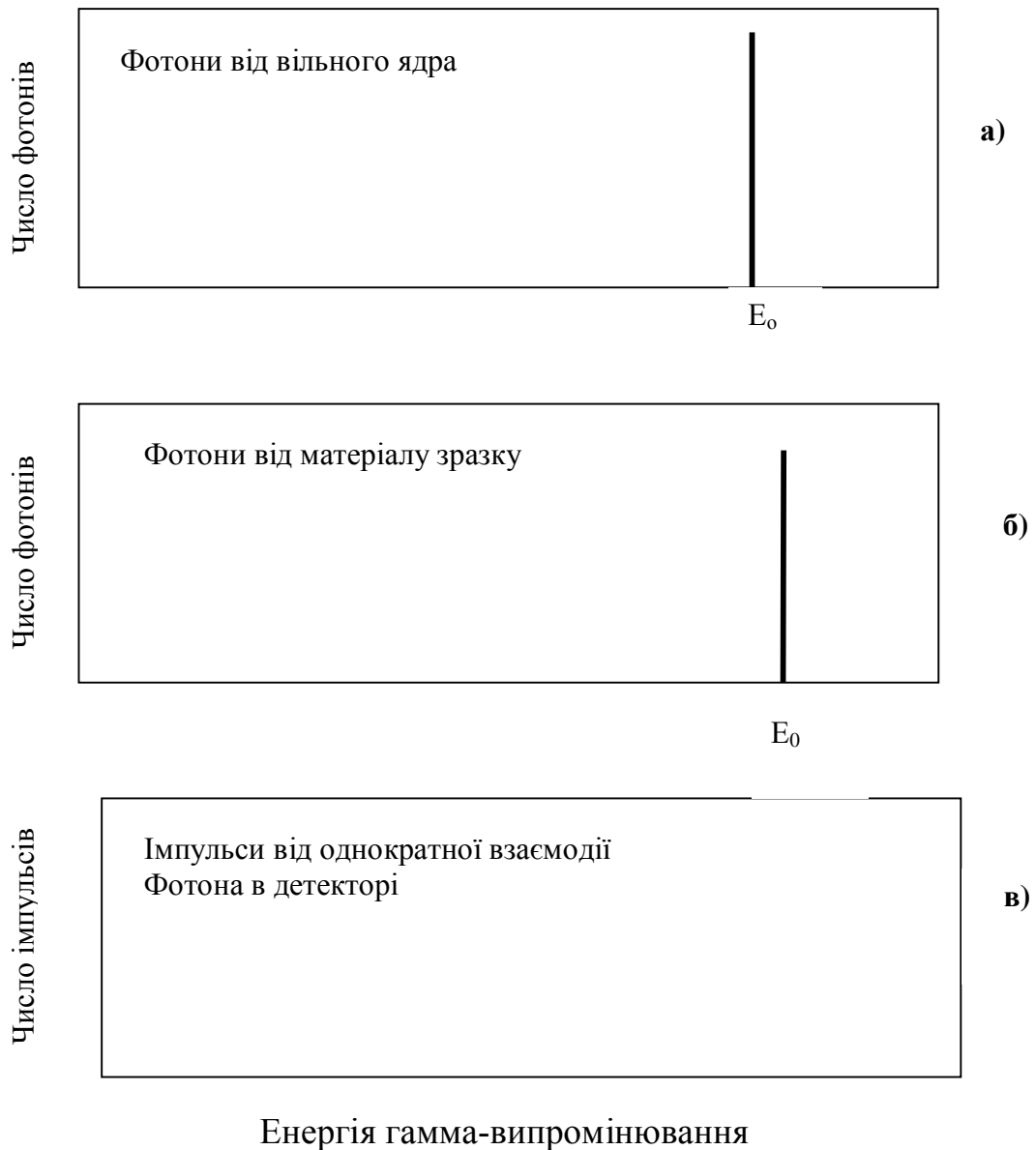


Рис.4.11 – Ідеальний фотонний спектр:

а – утворений вільним ядром;


б – випущений матеріалом зразка;

в – утворений у результаті взаємодії в детектуючому середовищі.

про його фактичної енергії. Події багаторазового рентгенівському розсіювання для одного фотона можуть призвести до утворення заряду, кількість якого близько до значення повної енергії вихідного фотона. Однак сигнали, утворені в результаті рентгенівському розсіювання, в основному, представляють одну взаємодію розсіювання і нижче по амплітуді, ніж

сигнали повної енергії. Ідеалізований відгук детектора на фотоелектричних і комптоновські взаємодії в детектуючому середовищі показано на рис. 4.11(в). Максимальна енергія, яка може бути залишена в детектуючому середовищу в результаті рентгенівському розсіювання, відповідає розсіюванню фотона на кут 180° . Таким чином, імпульси детектора, утворені від рентгенівського розсіювання, розподілені в області нижче цієї максимальної енергії (E_c на рис.4.11(в)) і складають джерело «фонових» імпульсів, які не містять корисної інформації про енергію фотона.

Пік повного поглинання (див. рис. 4.11(в)) значно розширено внаслідок статистичних флуктуації кількості пар електрон-іон, утворених фотоелектронів. Такий ефект вносить основний вклад в ширину піку повного поглинання і, тим самим, є домінуючим чинником, що визначає енергетичну роздільну здатність детектора [5].



№	Название	Тип	Отклик	Матрица	Шаблон
1	Detektor	Coaxial	Есть	Есть	Есть
2	fdcgdfqdf	Scintillator			
3	Гамма1СНВ СПбФ	Scintillator	Есть	Есть	Есть
4	GEM-15185	Coaxial	Есть	Есть	Есть

Рис.4.12 – Вибираємо потрібний детектор

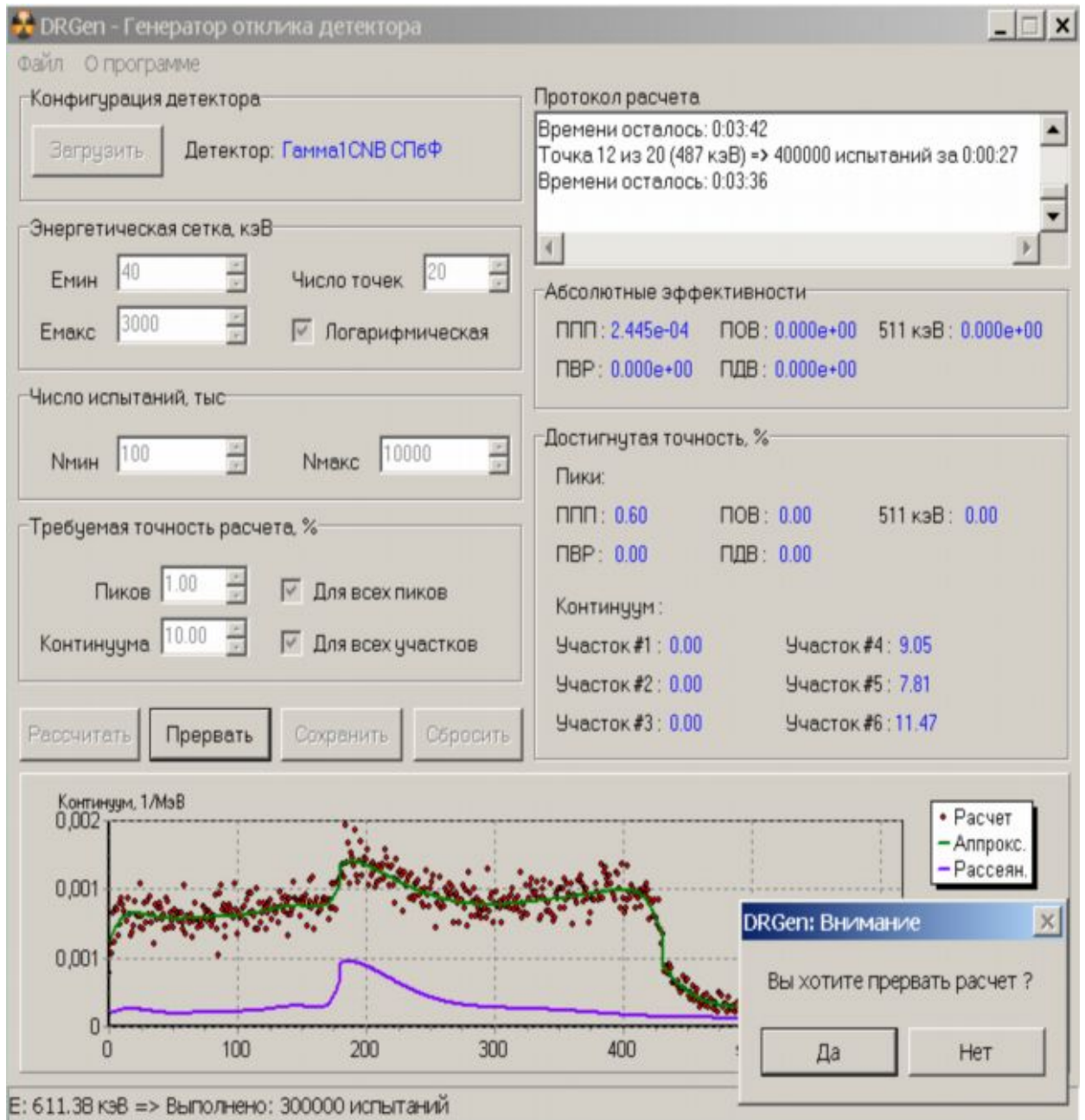


Рис.4.13 – Розраховуємо відгук детектора

Для розрахунку матриці відгуку потрібно загрузити детектор та аналізатор. Параметри аналізатора будуть впливати на матрицю відгуку.

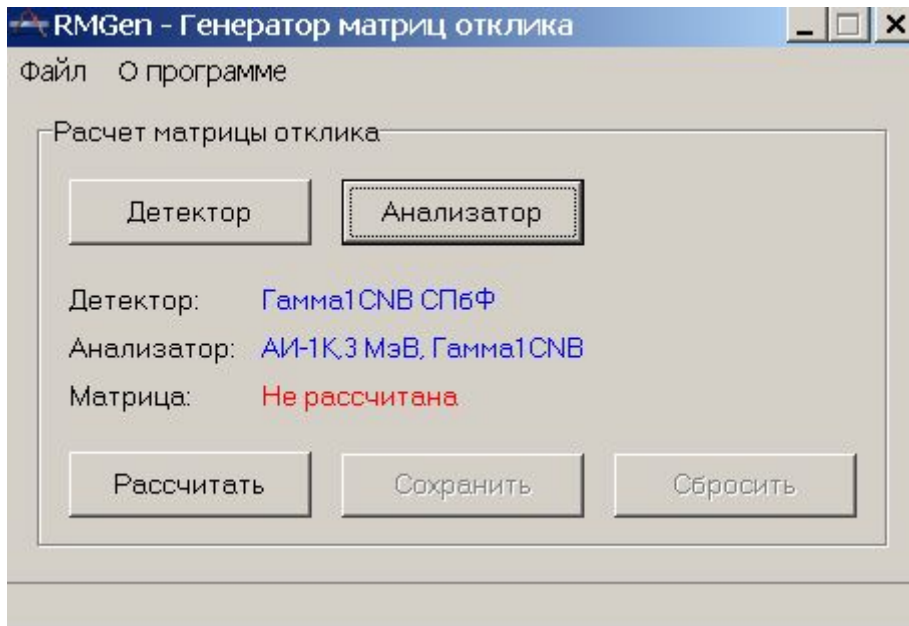


Рис.4.14 – Розрахунок матриць відгуку

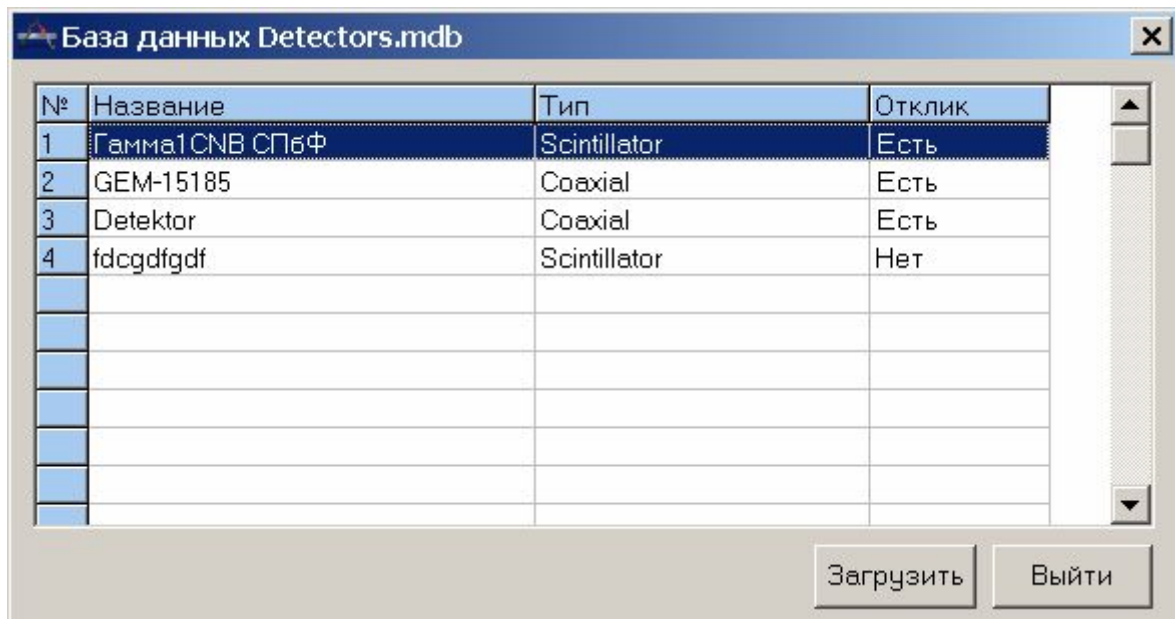


Рис.4.15 – Вибираємо детектор

№	Название	Каналов	кэВ/канал	ПШПВ_122	ПШПВ_1332
1	АИ-1К, 3 МэВ, Гамма1С	1024	3	16	80
2	АИ-8К, 1200 кэВ, GEM-1	8192	0,14885	0,95	1,83
3	АИ-8К, 2.6 МэВ, GEM-15	8192	0,32859	0,95	1,83
4	analizator	1024	3	1	2,2

Рис.4.16 – Вибираємо аналізатор

Для розрахунку фізичного спектру потрібно указати всі конфігурації:

- детектор;
- коліматор;
- зразок.

Нижче зображено завантаження цих конфігурацій (рис. 4.17 - 4.20)

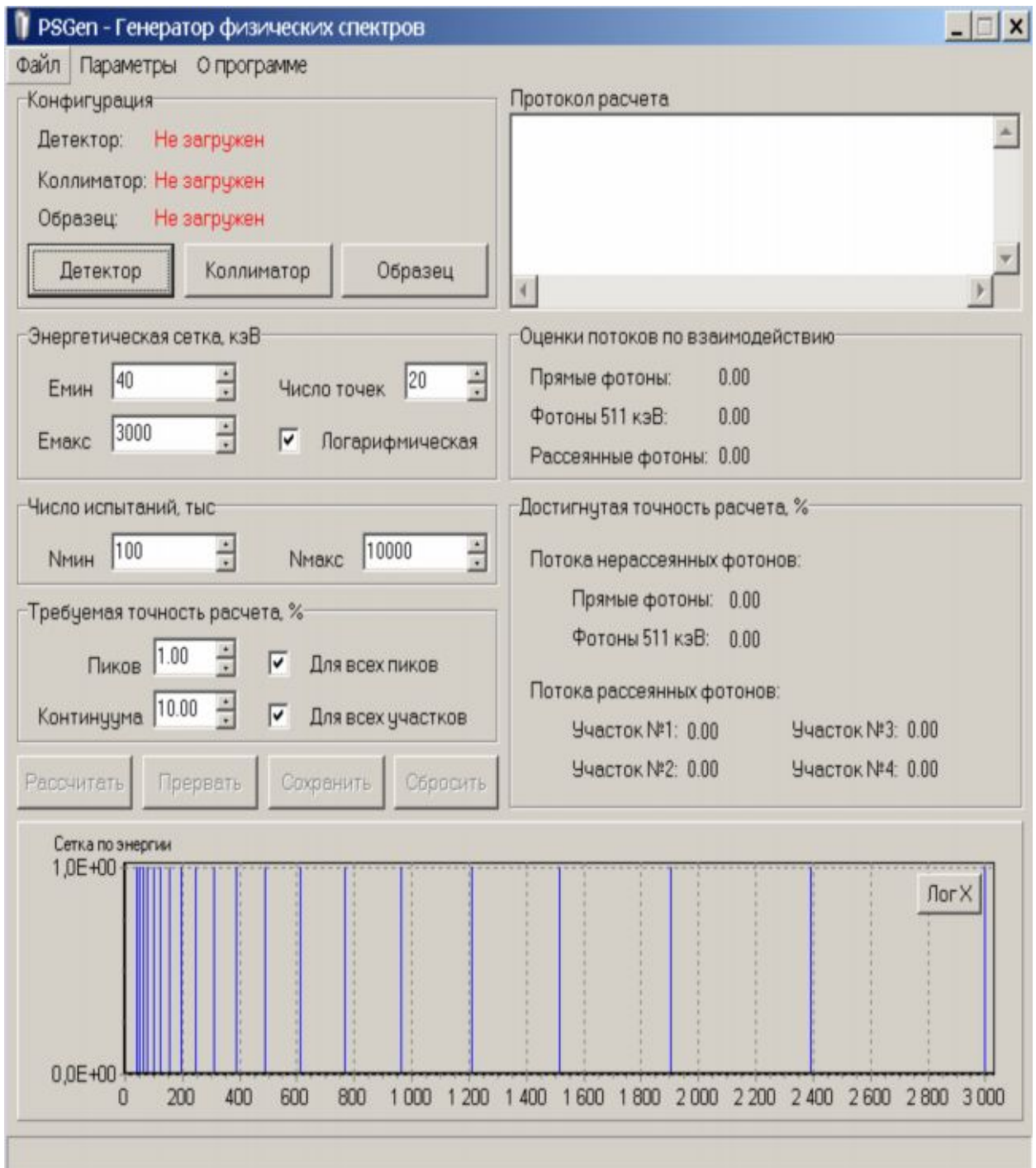


Рис.4.17 – Розраховуємо фізичний спектр

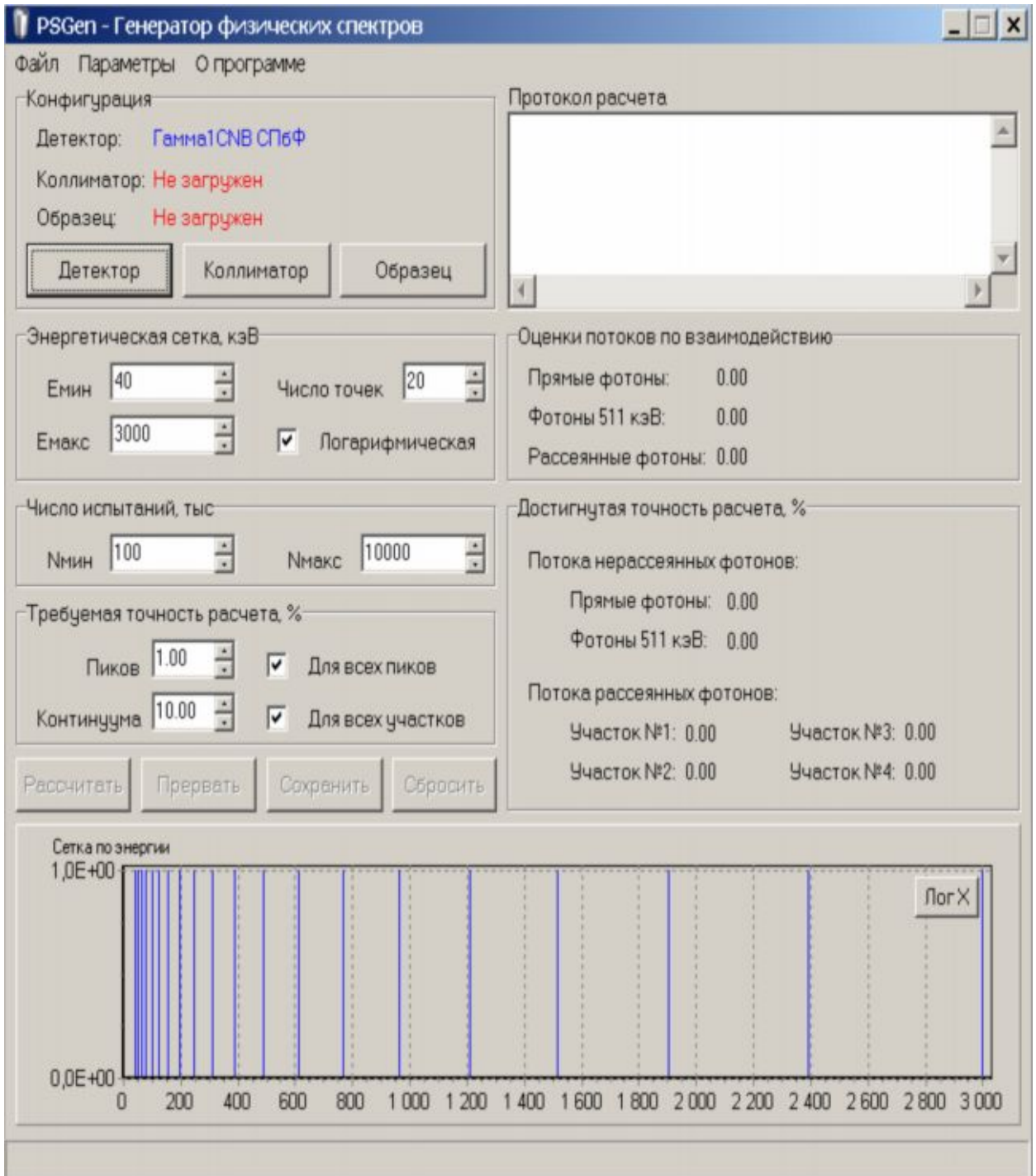


Рис.4.18 – Завантажуємо детектор для фізичного спектру

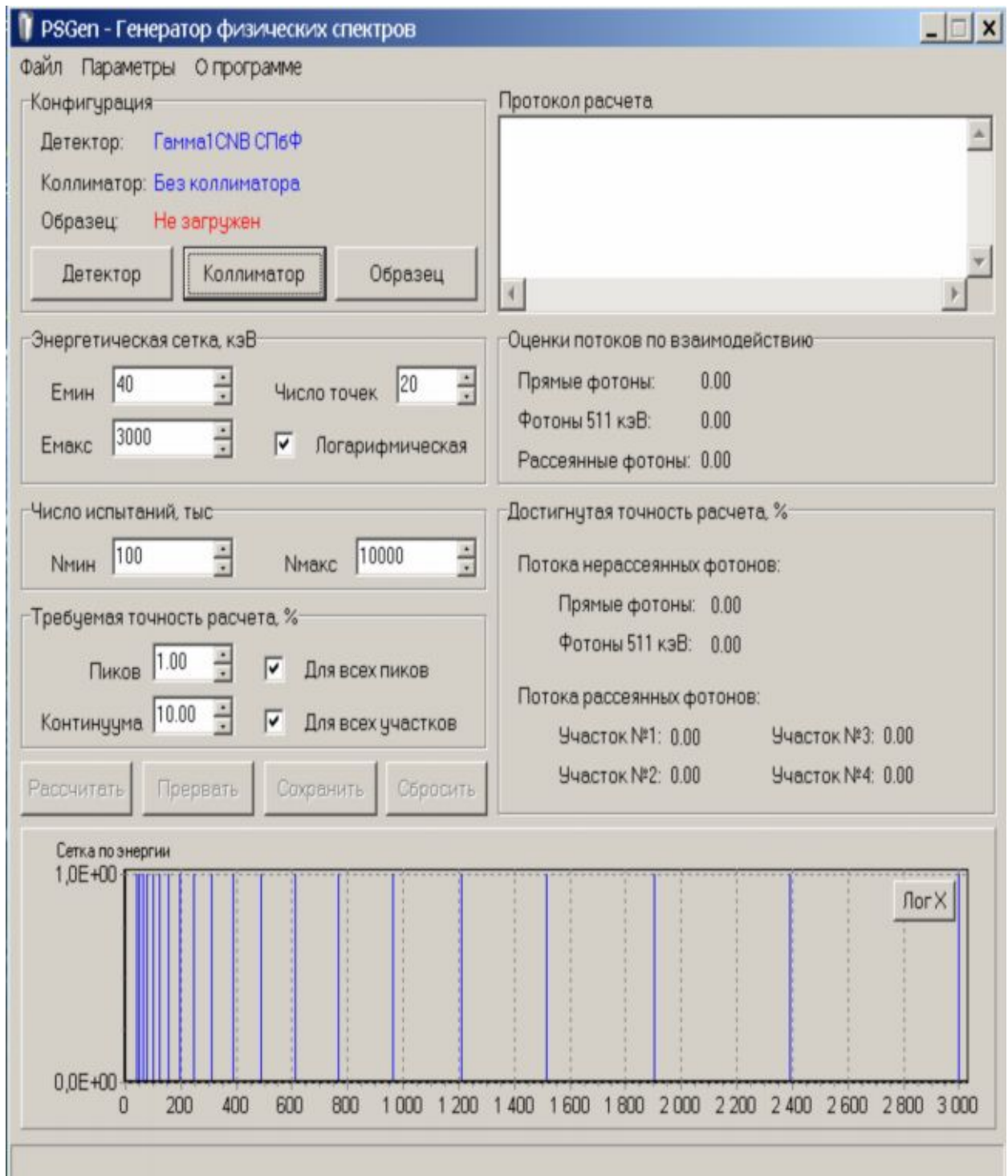


Рис.4.19 – Завантажуємо коліатор для фізичного спектру

Після завантаження усіх даних йде розрахунок фізичного спектру, у результаті ми отримали пряму лінію, тому що джерело точкове, амплітуда розсіяного випромінювання дорівнює нулю, у наслідок відсутності у джерелі ефектів розсіювання.

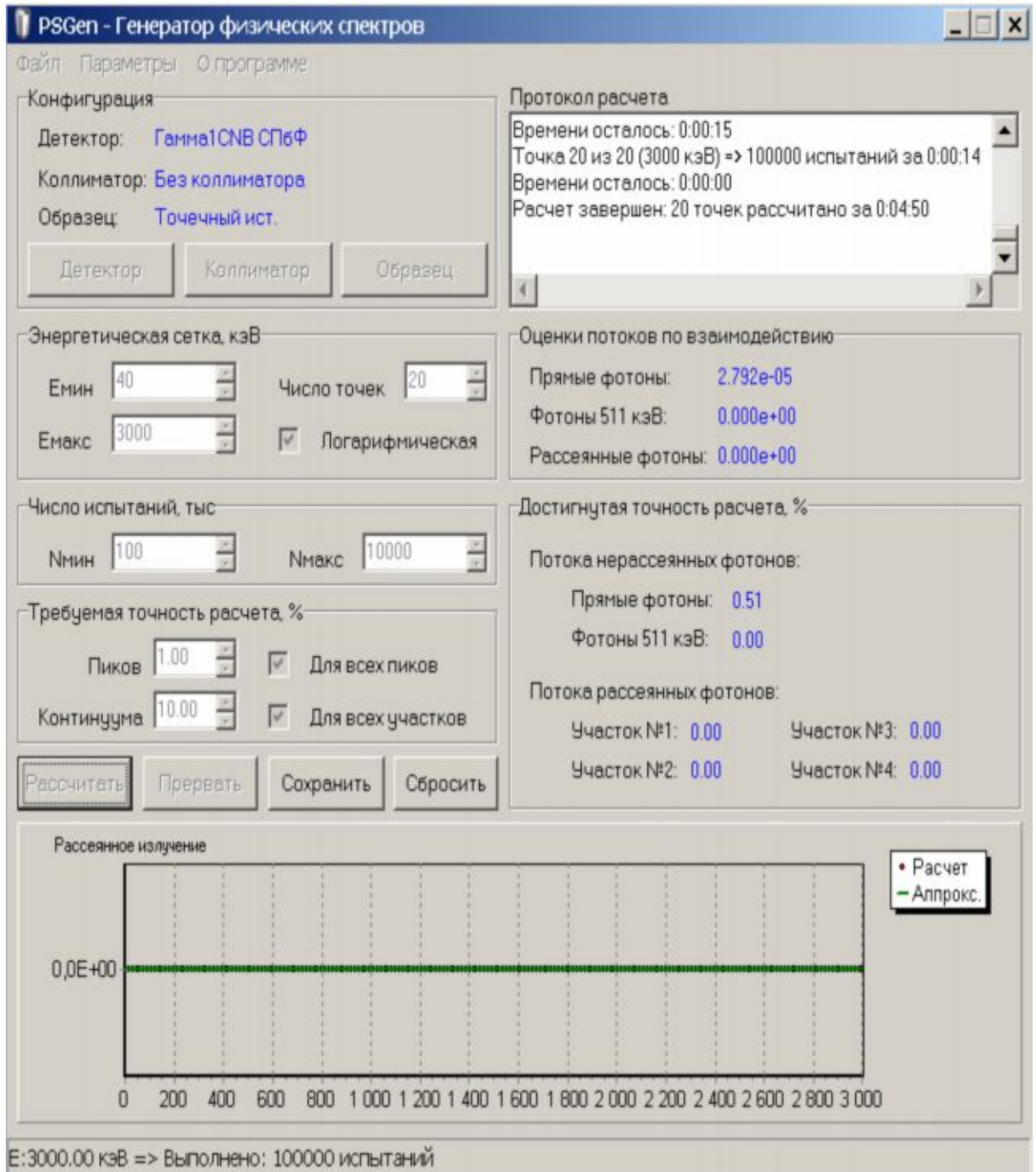


Рис.4.20 – Завантажуємо зразок і розраховуємо фізичний спектр

Для того, щоб згенерувати шаблон спектру (Рис. 4.20) потрібно вибрати наступні дані: Матрицю відгуку, фізичний спектр, джерело.

Джерело вибирається за допомогою програми Мастер-Нуклід. Генерується енергетичний розподіл (Рис.4.21) для вибраної суміші ізотопів з вказаними активностями [5].

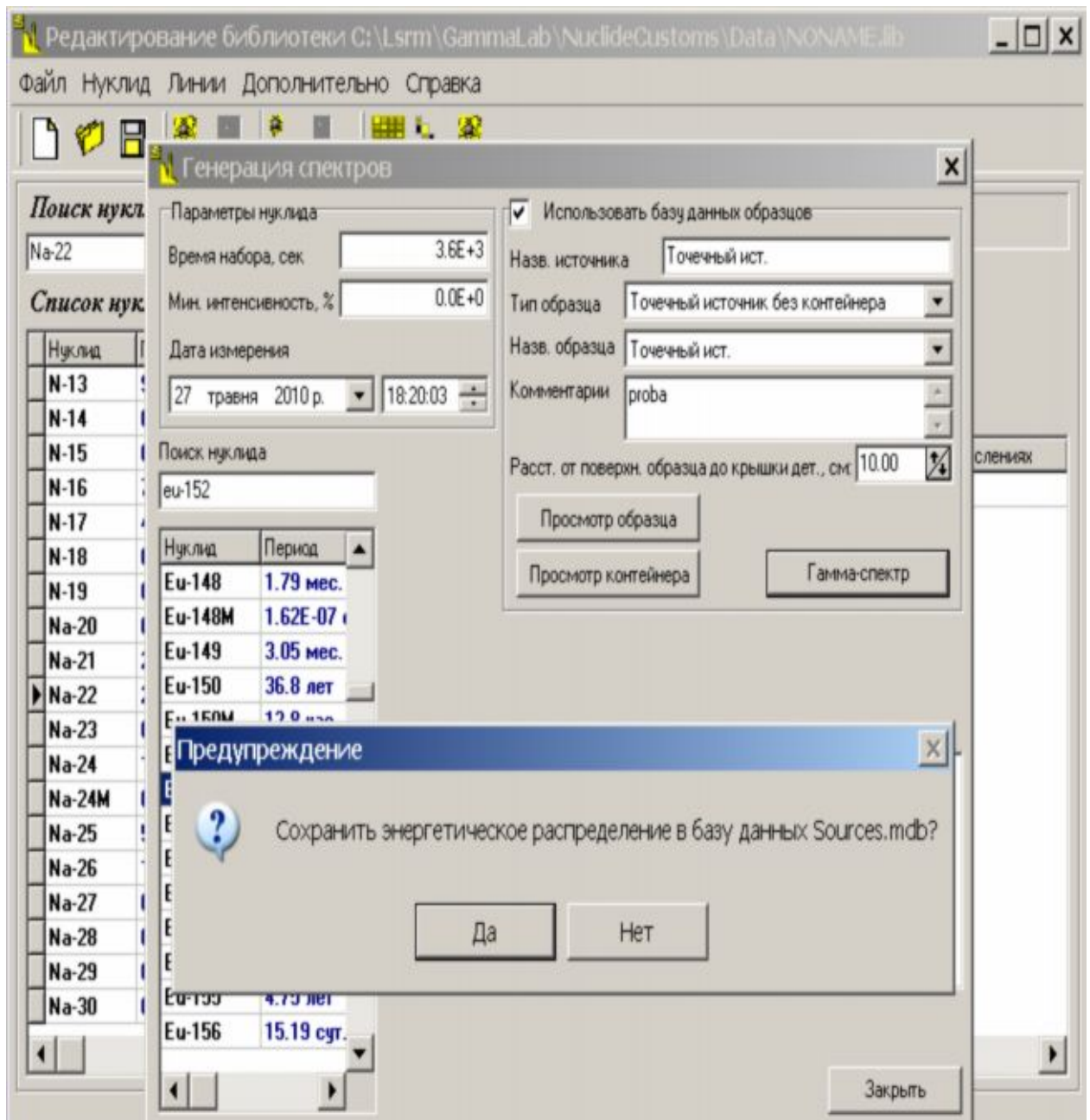


Рис.4.21 – Генерація енергетичного розподілу ізотопів

При генерації шаблону спектру враховується вплив конфігурацій спектрометра на перетворення істинного спектру проби в апаратний.

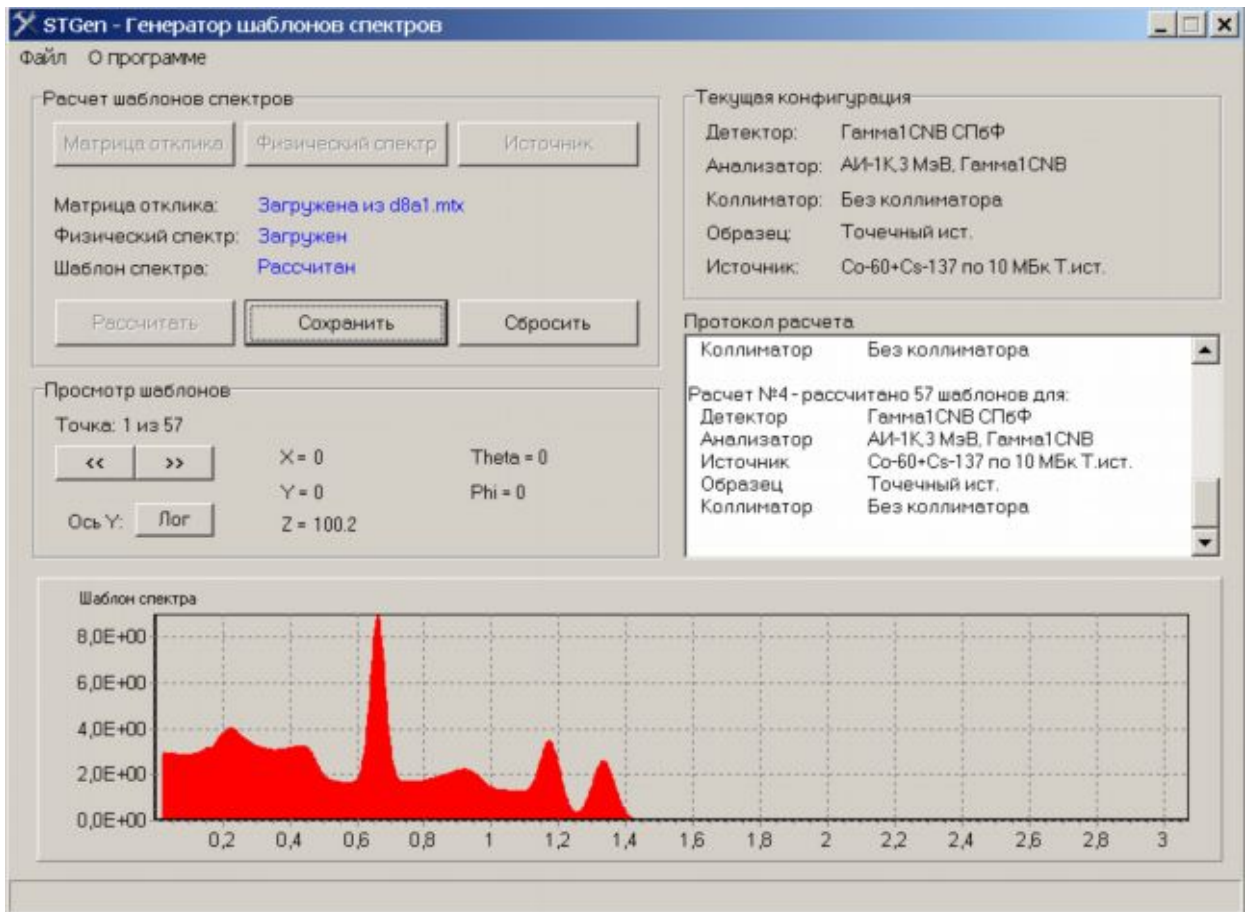


Рис.4.22 – Генеруємо шаблони спектрів

База данных ResMatrices.mdb

№	Детектор	Анализатор
1	GEM-15185	АИ-8К, 1200 кэВ, GEM-1585
2	GEM-15185	АИ-8К, 2,6 МэВ, GEM-15185
3	Гамма1СНВ СПбФ	АИ-1К,3 МэВ, Гамма1СНВ
4	Detektor	analizator

Загрузить Выйти

Рис.4.23 – Вибираємо матрицю відгуку

База данных PhysSpecs.mdb

№	Детектор	Коллиматор	Образец
1	Гамма1СNB СПбФ	Без коллиматора	Точечный ист. в КИЗ-05 Н
2	Гамма1СNB СПбФ	Гамма1С-50мм	Гексафторид в ТУК-30
3	Гамма1СNB СПбФ	Гамма1С-50мм	Гексафторид в ТУК-48G
4	Гамма1СNB СПбФ	Гамма1С-50мм	200л бочка -вода
5	Гамма1СNB СПбФ	Без коллиматора	Точечный ист. в КТ1-10, Н
6	Гамма1СNB СПбФ	Без коллиматора	Точечный ист. в КИЗ-29, Н
7	Гамма1СNB СПбФ	Без коллиматора	Точечный ист. в КТ1-20 Н
8	Гамма1СNB СПбФ	Без коллиматора	Точечный ист. в КТ1-5, Н
9	Гамма1СNB СПбФ	Без коллиматора	200л бочка -вода
10	Гамма1СNB СПбФ	Без коллиматора	Точечный ист. в УКТ1А-11
11	Гамма1СNB СПбФ	Без коллиматора	Точечный ист.

Внимание: Записи для данного детектора.

Загрузить Выйти

Рис. 4.24 – Выбираемо физический спектр

База данных Sources.mdb

№	Название	Комментарий	Шаблон
1	Th-232 (1 год) точечный		
2	U без контейнера		
3	U-235 - без контейнера		
4	Th-232		
5	Th-232		
6	Eu ОСГИ-100кБк	Eu-100кБк	
7	Co-57 100кБк	Co-57 100кБк	
8	Точечный ист.	Co-57 100кБк	
9	Ba-133 ОСГИ-100кБк	Co-57 100кБк	
10	Am-241 ОСГИ-100кБк	Am-241	
11	Eu-152 не спектре		

Внимание: Источники для выбранного образца

Загрузить Выйти

Рис. 4.25 – Выбираемо джерело

За допомогою цього програмного комплексу «Гамма-лаб» можна отримати різні спектри, ось наприклад: Th-232 та спектри із змішаними ізотопами, які зображені на рисунках 4.26– 4.29.

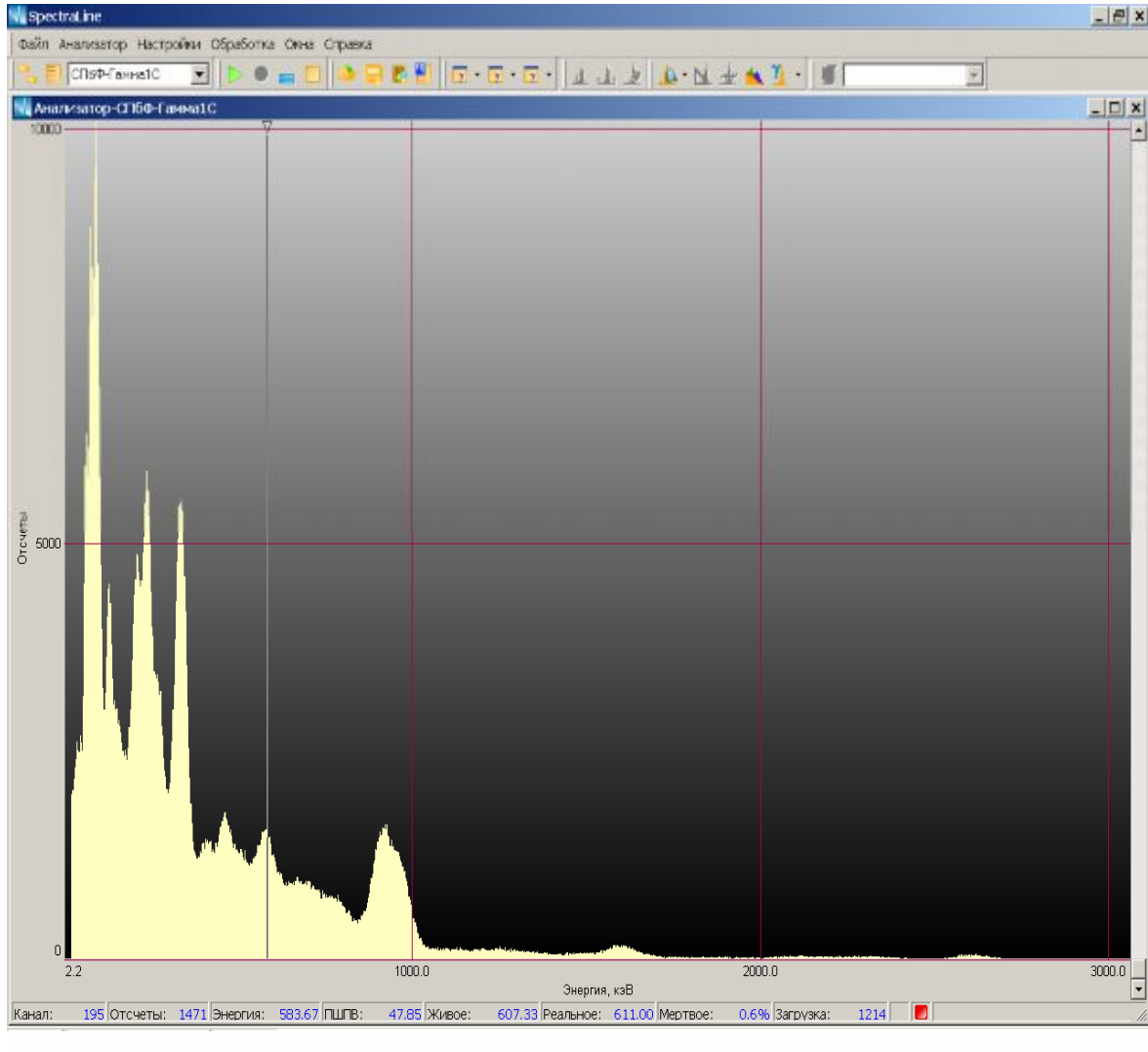


Рис. 4.26 – Спектр Th-232

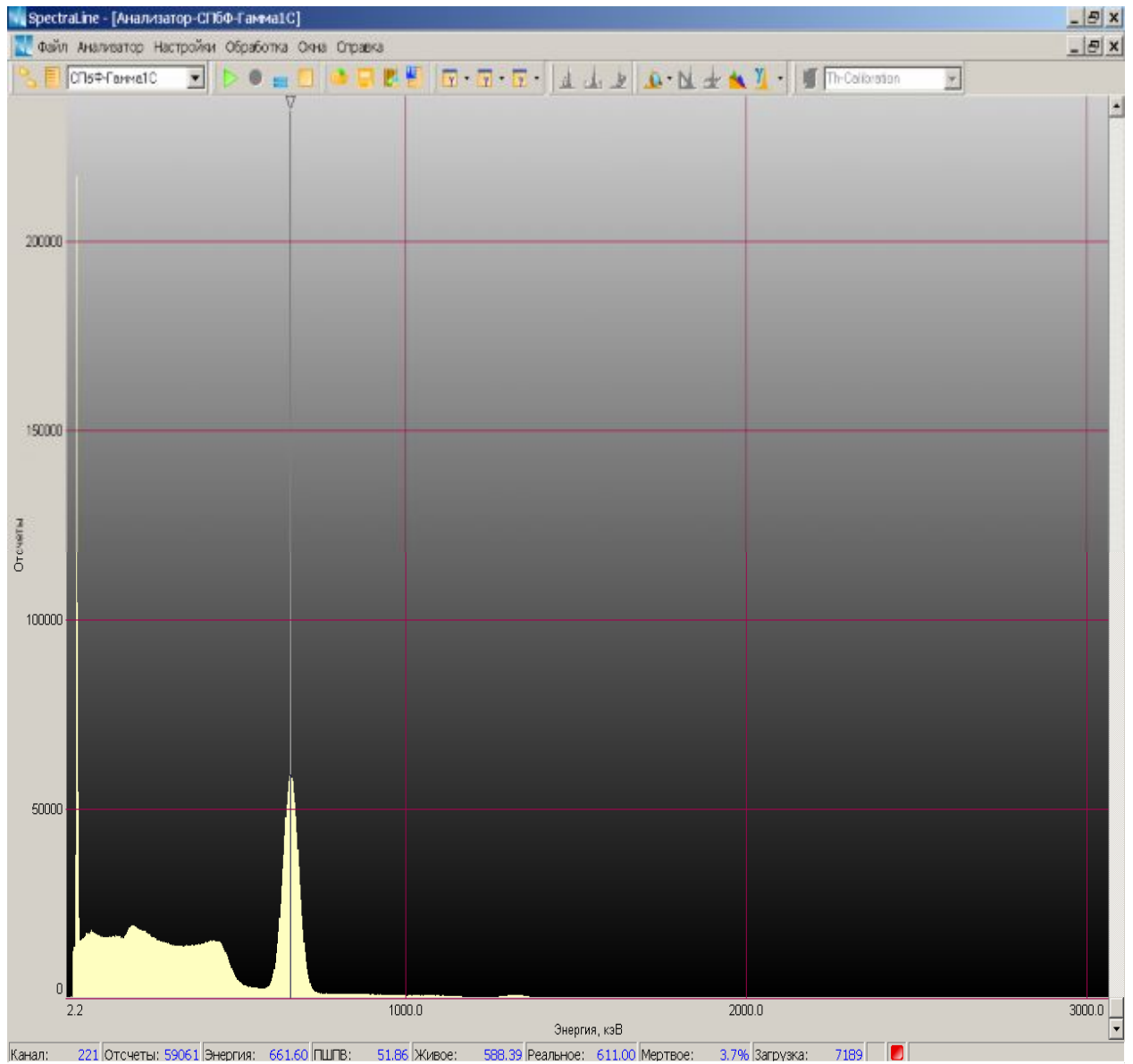


Рис. 4.27 – Спектр ізотопів Ra-226, Th-232, K-40, Cs-137

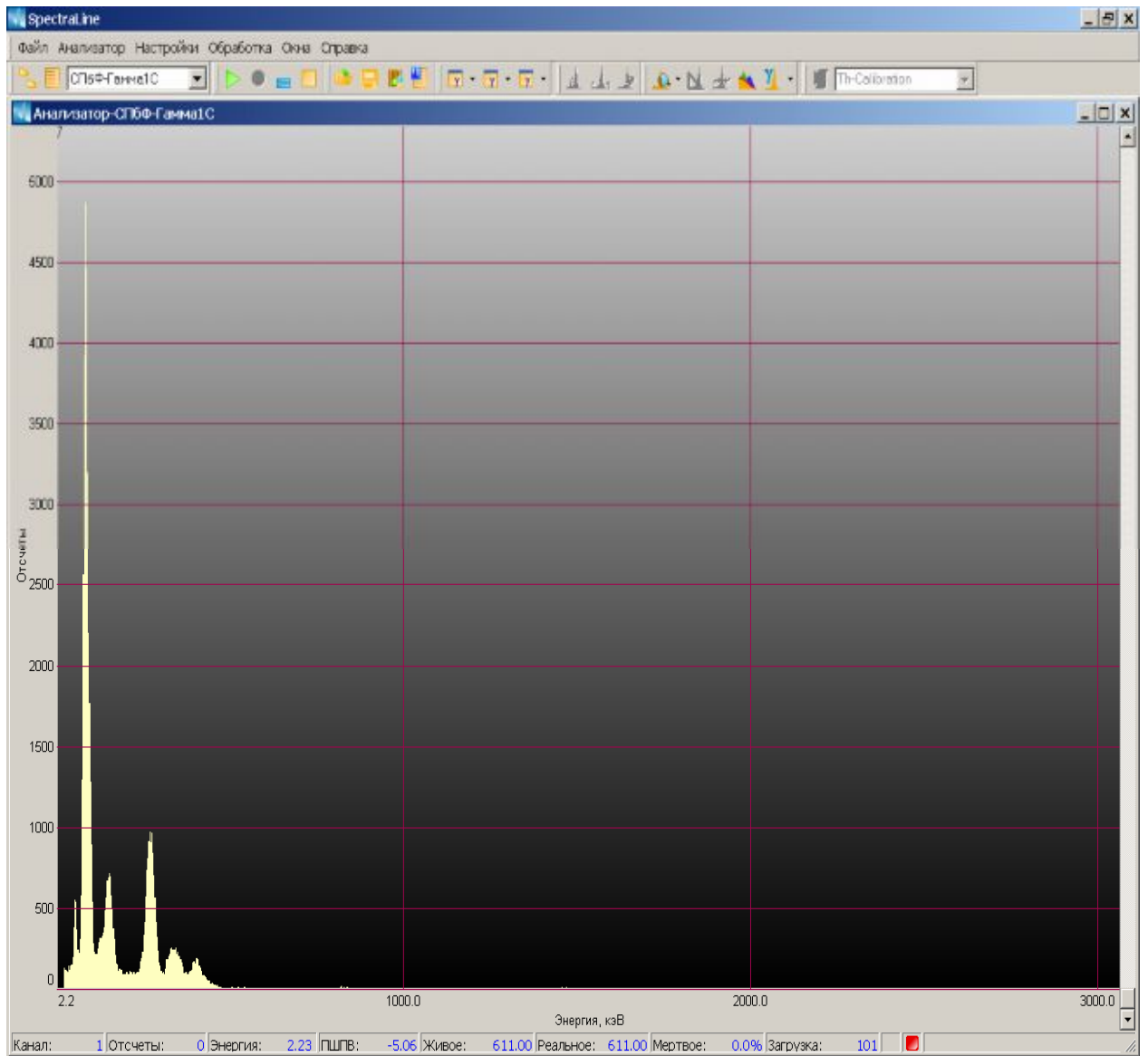


Рис. 4.28 – Спектр изотопів Ra-222, Rn-220, K-40, Ra-223

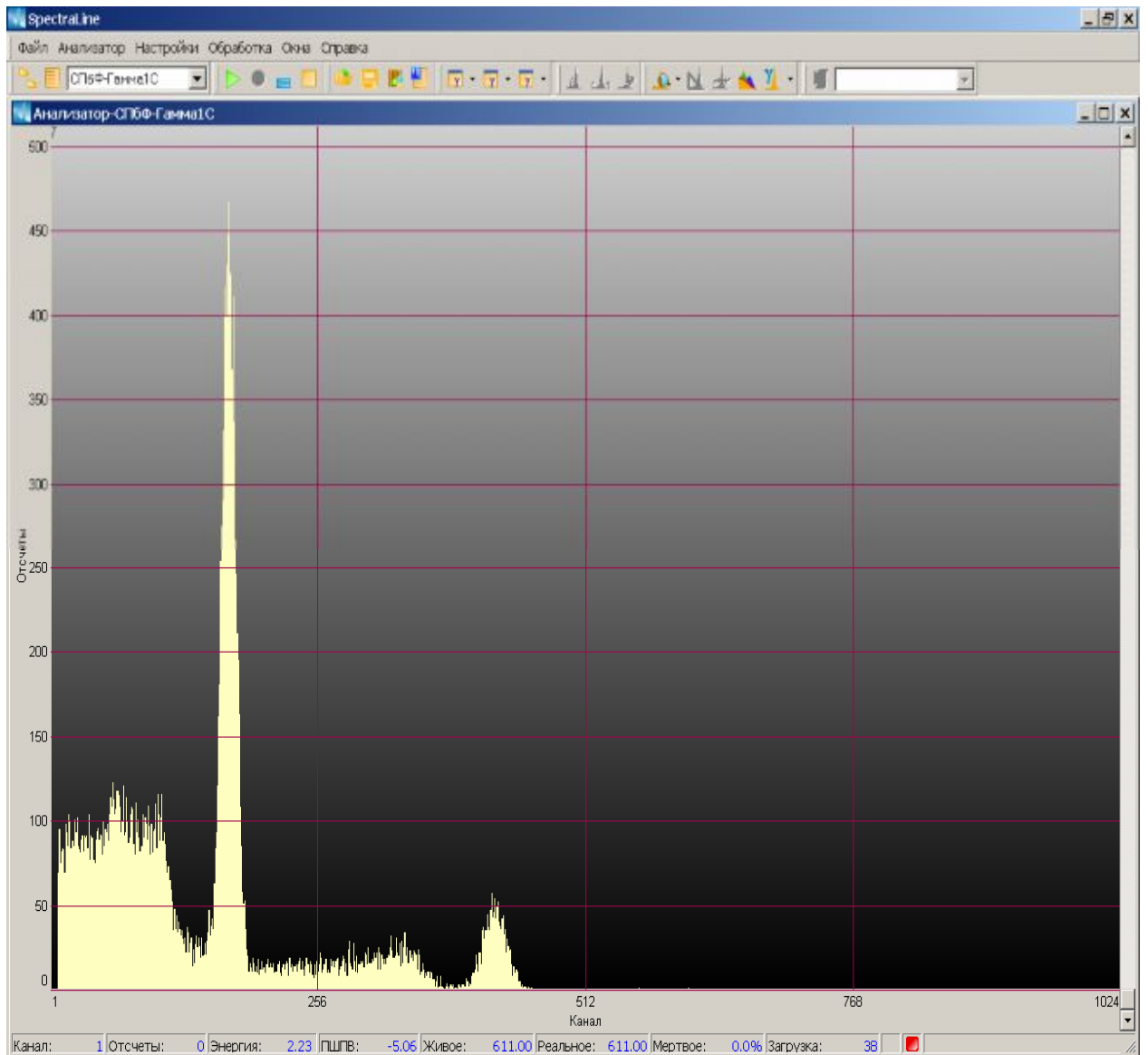


Рис. 4.29 – Спектр ізотопів I-125, U-230, Na-22

5 СТРУКТУРА І МОЖЛИВОСТІ REDDECAY

5.1 Структура і можливості RadDecay

RadDecay - це інтерактивна програма для відображення інформації про радіоактивний розпад для будь-якого з радіонуклідів у бібліотеках. RadDecay постачається зі стандартною бібліотекою Nuclide із 497 нуклідів та трьома додатковими бібліотеками (ICRP-107, ICRP-38 та MIRD). Дані, що відображаються, включають періоди напіввиведення, радіоактивні дочірні нукліди, ймовірності на розпад та енергію продукту розпаду для альфа, бета, позитронів, електронів, рентгенівських променів та гамма-променів. RadDecay також генерує дисплеї, графіки та роздруківки для складених даних бета-спектру.

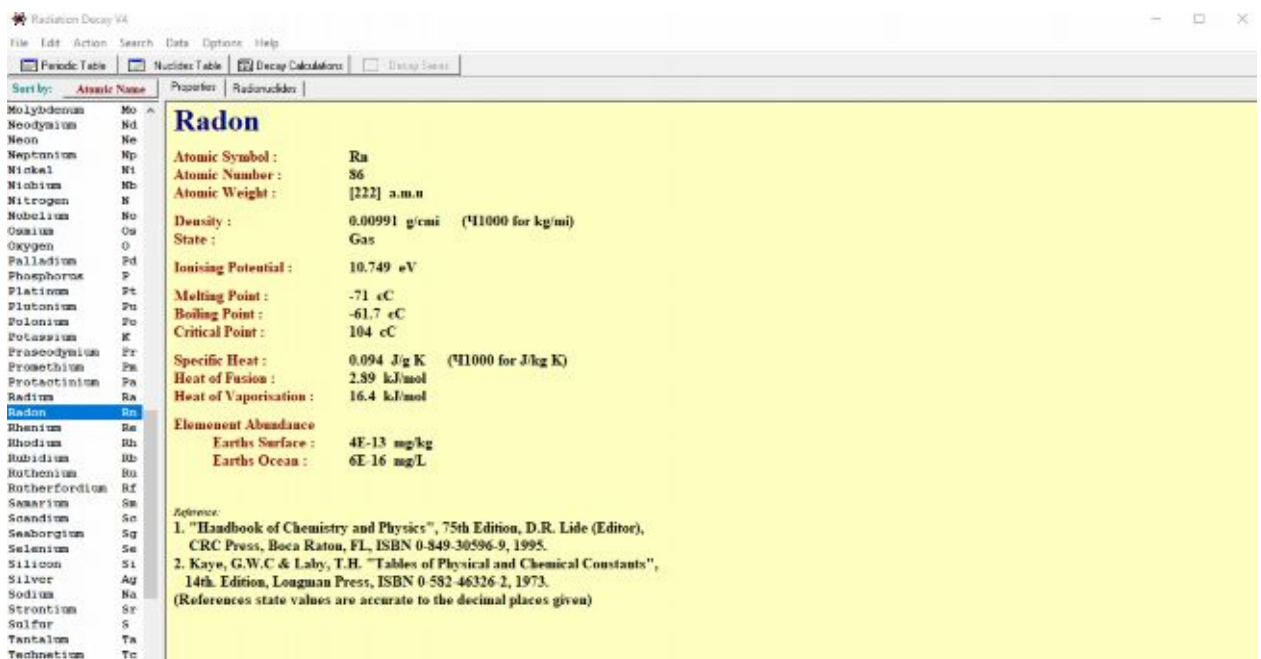


Рис.5.1 Бібліотекою Nuclide із 497 нуклідів

RadDecay проводить обчислення занепаду для одного нукліда або набору нуклідів. Для одного нукліда, враховуючи початкову активність та час розпаду користувачем, RadDecay обчислить решту активності нукліда та активність його потомства. Ланцюг розпаду обчислюється і відображається

протягом цілих 20 поколінь. Ідентичні дочірні нукліди, що утворюються вздовж різних гілок ланцюга розпаду, по черзі поєднуються та відображаються. Криві розпаду ланцюга та занепаду можуть легко відображатися та друкуватися. Користувачі можуть відображати інформацію, натискаючи будь-який нуклід у відображеному ланцюзі розпаду.

RadDecay також проводить обчислення розкладу для набору нуклідів та формує зведений звіт для перегляду, друку та збереження. Користувач також має можливість встановити мінімальний показник активності. RadDecay здійснює пошук у своїй бібліотеці та повідомляє відповідні нукліди для фотонів, альфа, бета, електронів чи позитронів у визначених користувачем діапазонах енергії та періоду напіввиведення. Серед вдосконалень та удосконалень щодо попередніх версій:

1. Розрахунки розкладу множинного нукліда, індивідуальний набір і партіями.
2. Вибір одиниць для введення та виведення обчислень розкладу множинних нуклідів.
3. Поліпшення графічного відображення та друку.
4. Вдосконалений інтерфейс користувача, простота роботи з ярликами.
5. Можливість копіювання результатів розкладу багато нуклідів у буфер обміну для імпорту в документи електронної таблиці та текстової обробки.
6. Доступні три додаткові нуклідні бібліотеки (ICRP-107, ICRP-38 та MIRD)
7. Розширені та покращені результати пошуку.
8. Функція, що дозволяє користувачеві вибирати потрібний шрифт друку, гнучкість у конфігурації.
9. Сумісність з міжнародними форматами дати.
10. Модифікована структура даних для підвищення продуктивності.
11. Можливість відображення даних для декількох нуклідів.
12. Можливість відображення інформації про будь-який нуклід, що відображається в ланцюзі розпаду.

5.2 Опис ядерно фізичних властивостей цезія Cs -137

Цезій (ІЮПАК написання) або цезій (Американське написання) є хімічним елементом з символом Cs і атомним номером 55. Це м'який, сріблясто-золотий лужної метал з температурою плавлення $28,5^{\circ}\text{C}$ ($83,3^{\circ}\text{F}$), що робить його один з п'яти елементарних металів, які є рідкими при або близько кімнатної температури. Цезій має фізичні і хімічні властивості, аналогічні рубідію і калію. Найбільш реакціонноспособним з усіх металів, це ПІРОФОРНА і реагує з водою навіть при -116°C (-177°F). Це найменш електронегативним елементом, із значенням 0,79 за шкалою Полінга. Вона

Start by:	Atomic Name	Properties	Radionuclides
Boron	B		
Bromine	Br		
Cadmium	Cd		
Caesium	Cs		
Calcium	Ca		
Californium	Cf		
Carbon	C		
Cerium	Ce		
Cesium	Cs		
Chlorine	Cl		
Chromium	Cr		
Cobalt	Co		
Copper	Cu		
Curium	Cm		
Dubnium	Db		
Dysprosium	Dy		
Einsteinium	Ea		
Element-110	110		
Element-111	111		
Erbium	Er		
Europium	Eu		
Fermium	Fm		
Fluorine	F		
Francium	Fr		
Gadolinium	Gd		
Gallium	Ga		
Germanium	Ge		
Gold	Au		
Hafnium	Hf		
Hassium	Hs		
Helium	He		
Holmium	Ho		
Hydrogen	H		
Indium	In		
Iodine	I		
Iridium	Ir		
Iron	Fe		
Krypton	Kr		
Lanthanum	La		
Lutetium	Lu		
Lead	Pb		

Cesium	
Atomic Symbol :	Cs
Atomic Number :	55
Atomic Weight :	132.90543 a.m.u
Density :	1.93 g/cm ³ (#1000 for kg/m ³)
State :	Liquid
Ionising Potential :	3.894 eV
Melting Point :	28.44 °C
Boiling Point :	671 °C
Specific Heat :	0.242 J/g K (#1000 for J/kg K)
Heat of Fusion :	2.092 kJ/mol
Heat of Vaporisation :	67.74 kJ/mol
Element Abundance	
Solar System :	1.21E-9 %
Earths Ocean :	3E-4 mg/L
References:	
1. "Handbook of Chemistry and Physics", 75th Edition, D.R. Lide (Editor), CRC Press, Boca Raton, FL, ISBN 0-849-30596-9, 1995.	
2. Kaye, G.W.C & Laby, T.H. "Tables of Physical and Chemical Constants", 14th. Edition, Loagman Press, ISBN 0-582-46326-2, 1973.	
(References state values are accurate to the decimal places given)	

має тільки один стабільний ізотоп, цезій-133. Цезій видобувається в

Рис.5.2 Пропорції цезія Cs-137

основному з поллукіта, в той час як радіоізотопи, особливо цезій-137, А продуктів поділу, витягуються з відходів, вироблених ядерних реакторів. Німецький хімік Бунзен і фізик Кірхгоф виявив, цезій в 1860 році знову розробленого методу полум'я спектроскопії. Перші невеликі додатки для цезію були як « геттер » в вакуумних трубках і фотоелементах. У 1967 році, діючи на Ейнштейн доказ того, що швидкість світла є найбільш постійним

вимірюванням в Всесвіту, Міжнародна система одиниць використовується два конкретних підрахунком хвиль від спектра випромінювання цезію-133 для спільних визначити другий і на метр . З тих пір, цезій широко використовується в високоточних атомного годинника . З 1990 - х, найбільшим застосуванням елемента було, як форміат цезію для бурових розчинів , але має ряд застосувань у виробництві електроенергії, в електроніці, і в хімії. Радіоактивний ізотоп цезій-137 має період напіврозпаду близько 30 років, і використовується в медичних цілях, промислових датчиках і гідрології. Нерадіоактивні з'єднання цезію є лише помірно токсичним , але тенденція чистого металу до вибуховим реагують з водою означає, що цезій вважається небезпечним матеріалом, і радіоізотопи представляють значну здоров'я і екологічну небезпеку в навколишньому середовищі.

Цезій є м'яким елементом (він має твердість 0,2 Мооса). Це дуже пластичним , блідо - метал, який темніє в присутності слідів кисню . Коли в присутності мінерального масла (де найкраще зберігати під час транспортування), вона втрачає свій металевий блиск і бере на себе нудніше, сірий зовнішній вигляд. Вона має температуру плавлення $28,5^{\circ}\text{C}$ ($83,3^{\circ}\text{F}$), що робить його одним з небагатьох елементарних металів, які є рідкими поблизу кімнатної температури . Ртуть є єдиним елементним металом з відомою температурою плавлення нижче, ніж цезій. Крім того, метал має досить низьку температуру кипіння , 641°C (одна тисяча сто вісімдесят шість $^{\circ}\text{F}$), то найнижче зі всіх, крім ртуті металів. Його з'єднання горять синім або фіолетовим кольором.

Цезій метал має високою реакційною здатністю і дуже ПИРОФОРНА . Він самозаймається на повітрі, і реагує з водою з вибухом навіть при низьких температурах, тим більше, ніж в інших лужних металів (перша група з періодичної таблиці). Він вступає в реакцію з твердої води при низьких температурах, як -116°C (-177°F). З - за цієї високою реакційною здатністю, цезій метал класифікується як небезпечний матеріал . Він

зберігається і поставляється в сухих, насичених вуглеводнів, таких як мінеральне масло . Він може бути оброблений тільки під інертним газом , таким як аргон. Проте, цезій-вода вибухи часто менш потужні, ніж натрій - вода вибухи з аналогічною кількістю натрію. Це тому, що цезій вибухає миттєво при контакті з водою, в результаті чого мало часу для водню накопичуватися. Цезій можна зберігати в герметичній боросилікатного скла ампули . В кількості більш ніж приблизно 100 г (3,5 унції), цезій поставляється в герметичних контейнерах, з нержавіючої сталі. Цезій-137 є радіоізотопи зазвичай використовується як гамма - -emitter в промислових цілях. Його переваги включають в себе період напіврозпаду приблизно 30 років, його доступність від ядерного паливного циклу , і має ¹³⁷ Ba в якості стабільного кінцевого продукту. Висока розчинність в воді є недоліком, що робить його несумісним з великим басейном облучателей для виробництва продуктів харчування і медикаментів. Він був використаний в сільському господарстві, лікування раку і стерилізації харчових продуктів, осади стічних вод, і хірургічне обладнання. Радіоактивні ізотопи цезію в радіаційних пристроях використовувалися в медицині для лікування деяких видів раку, але поява кращих альтернатив і використання хлориду цезію водорозчинного в джерелах, які могли б створити широкомасштабне забруднення, поступово ввести деякі ці джерела цезію з використання. Цезій-137 був використаний в різних промислових датчиків вимірювання вологості, в тому числі, щільності, вирівнювання і товщиномірів. Він також використовується в геофізичних досліджень свердловин пристрої для вимірювання щільності електронів з гірських порід, яка аналогічна об'ємної щільності утворень. Цезій-137 був використаний в гідрологічних дослідженнях, аналогічних тим, з тритієм . Як дочірнього продукту тестування бомби поділу з 1950 - х до середини 1980-х років, цезій-137 був випущений в атмосферу, де він був поглинений легко в розчин. Відомі з року в рік зміна протягом цього періоду дозволяє кореляцію з ґрунтом і осадовими шарами.

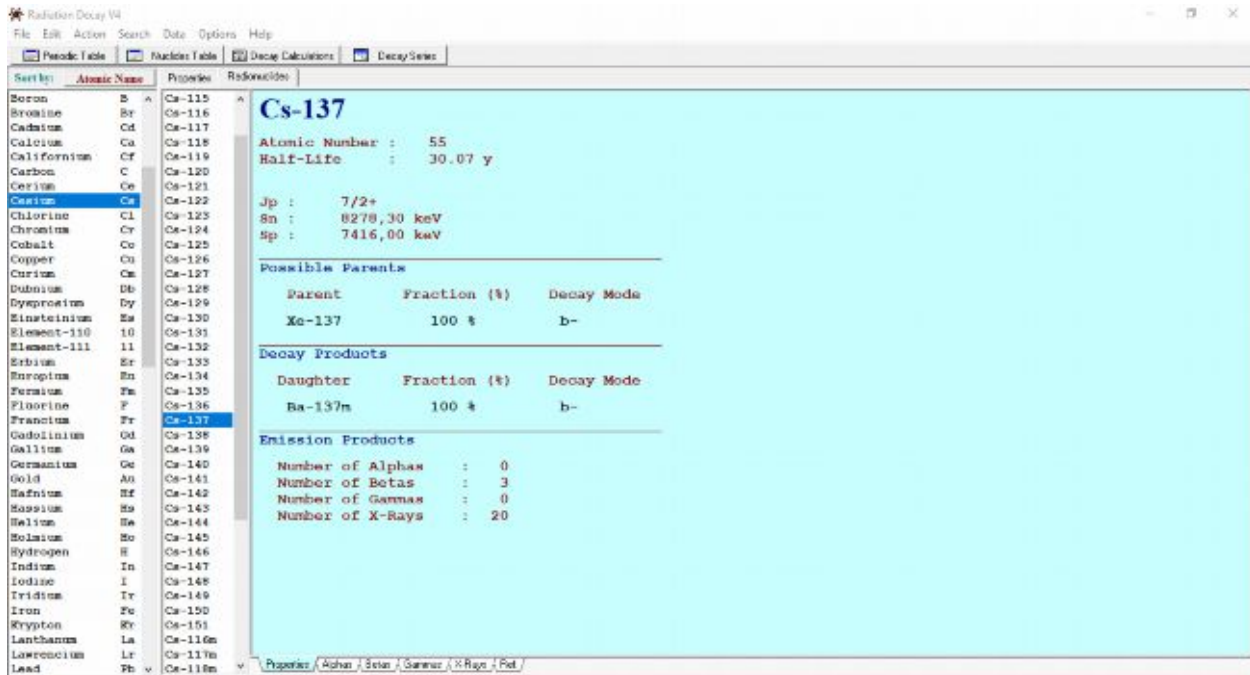


Рис.5.3 Радіонукліди цезія Cs-137

Цезій-134, і в меншій мірі, цезій-135, також був використаний в гідрології для вимірювання вихідного сигналу цезію ядерної енергетики. Незважаючи на те, що вони менш поширені, ніж або цезій-133 або цезій-137, ці ізотопи Bellwether виробляються виключно з антропогенних джерел.

При випробуваннях ядерної зброї утворюється тільки ^{137}Cs , і його максимальна активність в атмосферному повітрі і в ґрунті доводиться на 1964 і наступні роки. Розрахунки показують, що до 1963 р коли закінчилися випробування ядерної зброї в атмосфері, сумарна активність ^{137}Cs , викинута на той час в атмосферу, становила $9,62 \cdot 10^{17}$ Бк . Внаслідок цих випробувань глобальна щільність забруднення ґрунтів на 1983 р ^{137}Cs склала $3,3 \cdot 10^9$ Бк / км² .

Найбільш широко у всіх областях науки і техніки і в медицині застосовується ^{137}Cs . g-випромінювання ^{137}Cs використовується в хімічних і радіобіологічних дослідженнях, в гамма-дефектоскопії, в радіаційній технології. ^{137}Cs використовують як джерело g-випромінювання для контактної і дистанційної променевої терапії, а також для радіаційної стерилізації.

Цезій добре резорбується при будь-якому шляху надходження в організм людини. Всмоктування цезію в шлунково-кишковому тракті тварин і людини становить 100%. На окремих ділянках шлунково-кишкового тракту всмоктування ^{137}Cs відбувається з різною швидкістю. Через 1 год після введення ^{137}Cs в орган всмоктування по відношенню до введеної дози становить: в шлунку - 7%, в дванадцятипалій кишці - 77%, в тонкій - 76%, в клубовій - 78%, в сліпий - 13% і в поперечно ободовій кишці - 39% .

Через дихальні шляхи надходження ^{137}Cs в організм людини становить 0,25% величини, введеної з харчовим раціоном. При пероральному введенні основна частина активності спочатку зосереджується в кишечнику, потім реабсорбується в низхідних відділах. Потрапивши в кров, ^{137}Cs порівняно рівномірно розподіляється по органах і тканинах. Шлях надходження і вид тварини не впливають на характер розподілу ізотопів. Після внутрішньовенного введення ^{137}Cs швидко покидає кров'яне русло . У перші 10-30 хв максимальна концентрація спостерігається в нирках. Потім відбувається перерозподіл, і переважна більшість активності (до 52,2%) затримується м'язовою тканиною. Через 5 хв після внутрішньовенної ін'єкції в крові людини виявляється 27% від введеної кількості, через 2 год - 3,5% і через 10 діб. - 2% ^{137}Cs .

В умовах хронічного надходження ^{137}Cs накопичується в організмі до певної величини. Кратність накопичення цезію залежить від виду тварин. При тривалому пероральному введенні кратність накопичення у кроликів коливається від 8,1 до 2,3, а у собак вона може досягати 30, т. Е. В організмі може затримуватися в 30 разів більше радіонукліда, ніж надходить щодоби.

Виведення ^{137}Cs з організму відбувається в основному через нирки. Протягом першого місяця з сечею виводиться в 6-9 разів більше, ніж з калом, і за 1 місяць виводиться до 86% цезію від введеної кількості. При хронічному надходженні радіонукліда в організм після досягнення рівноважного стану виділення ^{137}Cs з сечею та калом постійно. З організму людини ^{137}Cs виводиться з Тб, рівним 70 діб., З м'язів, легенів і скелета - 140 діб. У 5 осіб з

випадково інкорпорованим ^{137}Cs , що піддавалися лікуванню, вивчали затримку радіонукліда в тілі. Встановлено, що Тб при відсутності лікування у різних осіб становив 124, 54, 61, 36 і 36 діб, а під час лікування Тб знизився до 38, 39, 25, 17 і 1,6 доби відповідно.

5.3 Опис ядерно фізичних властивостей стронція Sr -90

Стронцій є хімічним елементом з символом Sr і атомним номером 38. лужно - земельну металом , стронцій є м'який сріблясто-білий жовтувато - металевий елемент, який є високо хімічно активним . Металу утворює темний шар оксиду, коли вона піддається впливу повітря. Стронцій має фізичні і хімічні властивості, аналогічні тим, з його двох вертикальних сусідів в періодичній таблиці, кальцію і барію . Це відбувається природним чином в основному в мінералах целестина і стронціаніт, І в основному видобуває з них. У той час як природний стронцію є стабільним,

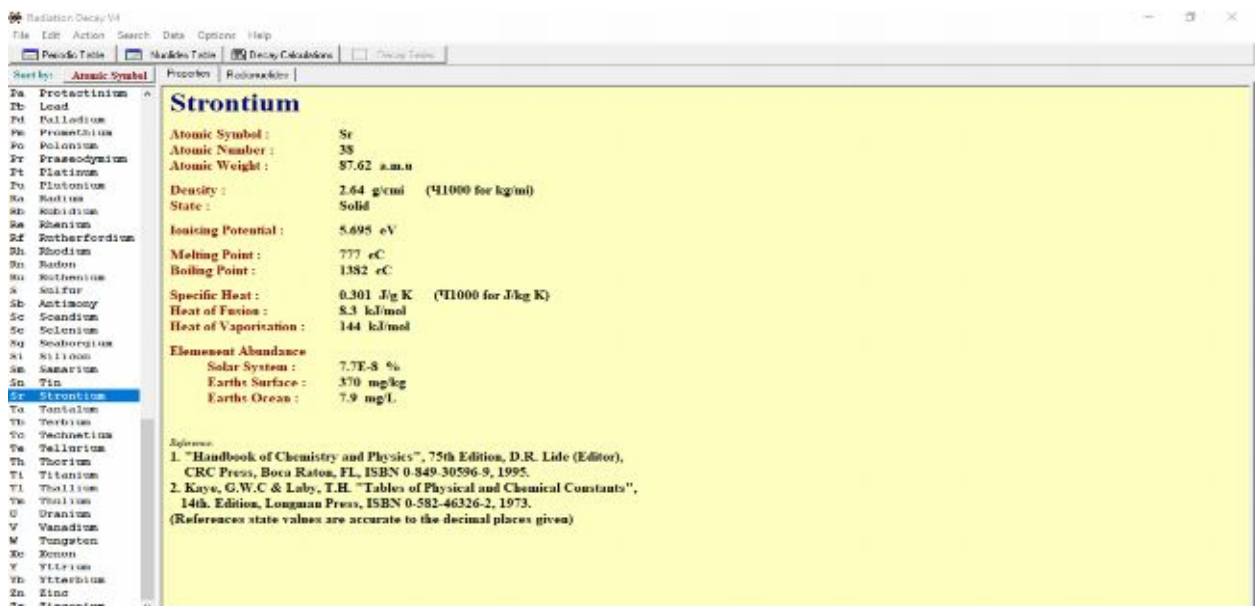


Рис.5.4 Пропорції стронція Sr-90

синтетичним ^{90}Sr ізотопів радіоактивні і є одним з найнебезпечніших компонентів радіоактивних опадів , так як стронцій поглинається організмом

аналогічним чином, як кальцій. Натуральний стабільний стронцій, з іншого боку, не є небезпечним для здоров'я.

Обидва стронцій і стронціаніт названі в честь Strontian , село в Шотландії, поблизу якої мінерал був виявлений в 1790 році Адер Кроуфорд і Вільям Cruickshank ; він був ідентифікований як новий елемент в наступному році від свого малинового червоного випробувального полум'я кольору. Стронцій був вперше виділений в якості металу в 1808 році Гемфрі Деві , використовуючи те, недавно виявлений процес електролізу . У 19 - м століття, стронцій в основному використовується у виробництві цукру з цукрових буряків (див strontian процесу). На піку виробництва телевізійних електронно - променевих трубок, Так само, як 75 відсотків споживання стронцію в Сполучених Штатах було використано для лицьовій панелі скла. Із заміною електронно - променевих трубок з іншими методами відображення, споживання стронцію різко зменшилася.

Стронцій є двовалентним сріблястий метал з блідо - жовтим відтінком, властивості якого в основному проміжне положення між і аналогічні тим, які його групи сусідів кальцію і барію . Він м'якше, ніж кальцій і важче, ніж барій. Його плавлення (777°C) і кипіння ($+1655^{\circ}\text{C}$) вказує нижче, ніж у кальцію (842°C по 1757°C відповідно); барію продовжує цю тенденцію до зниження температури плавлення (727°C), але не в точці кипіння (2170°C). Щільність стронцію ($2,64\text{ г / см}^3$) є аналогічним проміжним між кальцію ($1,54\text{ г / см}^3$) і барій ($3,594\text{ г / см}^3$). Три алотропія металевого стронцію існує, зточками переходу при 235 і 540°C .

Стандартний електродний потенціал для $\text{Sr}^{2+} / \text{Sr}$ пара становить $-2,89\text{ В}$, приблизно посередині між тими, $\text{Ca}^{2+} / \text{Ca}$ ($-2,84\text{ В}$) і $\text{Ba}^{2+} / \text{Ba}$ ($-2,92\text{ В}$) пар, а також близькі до з сусідніх лужних металів . Стронцій є проміжним між кальцієм і барієм в його реакційної здатності по відношенню до води, з якої вона вступає в реакцію при контакті з отриманням гідроксиду стронцію і воднем газу. Стронцій метали горять в повітрі, щоб виробляти як оксид стронцію і нітрид стронцію , але так як він не реагує з азотомнижче 380°C ,

при кімнатній температурі, він утворює тільки оксид спонтанно. Крім простого оксиду SrO, то пероксид SrO₂ можуть бути отримані шляхом прямого окислення стронцію металу під високим тиском кисню, і є деякі докази жовтого супероксид Sr(O₂)₂. Гідроксиду стронцію, Sr(OH)₂, є сильною основою, хоча це не так сильна, як гідроксиди барію або лужних металів. Всі чотири дигалогенідів стронцію відомі.

З - за великого розміру важких S-блокових елементів, включаючи стронцій, великий діапазон координаційних чисел, як відомо, від 2, 3, або 4, аж до 22 або 24 в SrCd₁₁ і SrZn₁₃. Sr²⁺ іони досить великі, так що високі координаційні числа є правилом. Великий розмір стронцію і барій грає важливу роль в стабілізації стронцію комплексів з полідентантними макроциклическими лігандами, такі як краун - ефіри, наприклад, в той час



Рис.5.5 Радіонукліди стронція Sr-90

к 18-краун-6 утворює відносно слабких комплексів з кальцієм і лужні метали, її стронцій і барій комплекси набагато сильніше. ⁹⁰Sr був іспользованкачестве джерела енергії для радіоізотопних термоелектричних генераторів (РТГ). ⁹⁰Sr виробляє близько 0,93 ват тепла на грам (вона ніжедля форми ⁹⁰Sr іспользуемого в РТГ, який є фторид стронцію. Теммене,

^{90}Sr має одну третину терміну служби і більш низьку плотністьчем ^{238}Pu , інший RTG палива. Основна перевага ^{90}Sr є точно це дешевлечем ^{238}Pu і виявляється в ядерних відходах. СРСР розгорнуто майже 1000 цих РТГ на його північному побережжєкачестве джерела енергії для маяків і метеорологічних станцій.

^{90}Sr - з виходами 5,77 і 2,25%. Значні кількості ^{90}Sr ($7,4 \times 10^{17}$ Бк) були викинуті в атмосферу при випробуваннях ядерної зброї в 1945-1980 рр. [6]. При викидах велика частина радіонуклідів потрапляє в стратосферу (шар атмосфери, що лежить на висоті 10-50 км) і залишається там протягом багатьох місяців, повільно опускаючись і розсіюючись по всій поверхні земної кулі. Період напіврозпаду ^{89}Sr становить 50,5 сут., і він, потрапивши в стратосферу при ядерних вибухах, в основному там і розпадається, не уявляючи такий великий радіаційної небезпеки для землян, як ^{90}Sr і ^{137}Cs , які, випадаючи, забруднюють поверхню Землі на багато років. З іншого боку, при аваріях на ядерних реакторах, таких, як на Чорнобильській АЕС, коли накопичена рівноважна активність ^{89}Sr в 10 разів перевищує активність ^{90}Sr , який через свого великого періоду напіврозпаду не встигає накопичитися за 2-3 роки роботи реактора, ситуація змінюється. Відразу після аварії на Чорнобильській АЕС активність викинутих короткоживучих радіонуклідів ^{89}Sr була у багато разів вище, ніж ^{90}Sr або ^{137}Cs [6]. Після випробувань ядерної зброї радіоактивні опади складаються в основному з водорозчинних і здатних до іонного обміну форм ^{90}Sr , в той же час після аварії на Чорнобильській АЕС ^{90}Sr нерідко осідала в формах стійких з'єднань [6].

При роботі АЕС ^{90}Sr , як і ^{137}Cs , викинутий в навколишнє середовище, в кінцевому підсумку накопичується або у верхніх шарах ґрунту в наземних системах, або в донних відкладах природних водних резервуарів. При цьому стронцій мігрує на дуже малі відстані, наприклад на 1 см за кілька років [6]. Проведені в кінці 1980-х рр. дослідження незораних ділянок в Киштиме, забруднених в 1957 р ^{90}Sr і іншими радіонуклідами внаслідок вибуху

відходів, показали, що ^{90}Sr за цей період часу досяг глибини 15 см, і це означає, що швидкість його міграції склала 0,5 см / г. З ґрунту через кореневу систему ^{90}Sr виноситься в рослини і входить до складу зерна, бобів, моркви та інших продуктів. Цей винос визначається коефіцієнтом переносу (КП), який залежить від виду ґрунтів і рН середовища. У табл. 13.14 наведені усереднені значення КП ^{90}Sr для ряду культур, отримані в [6]. З метою зменшення виносу ^{90}Sr з ґрунту в рослини застосовують оранку ґрунту і внесення добрив (табл. 13.15) [6]. Найбільш ефективна глибока оранка, яка веде до поховання активності нижче того шару, в якому знаходяться корені рослин. У районах Південного Уралу, забруднених ^{90}Sr після аварії в Киштиме, були отримані хороші результати при оранці на глибину 50 см. З даних табл. 13.15 слід, що дієвим заходом, поряд з внесенням з добривами N, P і K, є вапнування ґрунту.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто принципи дії роботи Гамма лаб та його функціональні можливості.
2. Детально розглянуто алгоритм створення нових джерел ІВ довільного радіонуклідного складу для довільної апаратурної конфігурації (детектор,аналізатор,коліматор)
3. Запропоновано типові конфігурації дерел ІВ які застосовують у зберіганні (транспортуванні) промислової продукції (бочка,ящик ,контейнер)
4. Проаналізовано функціональні можливості альтернативної гамма лабу бази даних RedDecay , яка містить вичерпні дані з ядерно фізичних характеристик більшості відомих ізотопів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. В.Н. Даниленко, Е.А. Ковальський, С.Ю. Федоровський, А.Ю. Юферов, "LSRM" - пакет прикладних програм для спектрометричного аналізу. Стан і перспективи. Тези V Міжнародної наради «Проблеми прикладної спектрометрії і радіометрії», Дубна, 2001., див. Також <http://www.lsrn.ru>.
2. Н.Г. Гусев, В.А. Климанов, В.П. Машкович, А.П. Суворов, Захист від іонізуючих випромінювань, т.1, Фізичні основи захисту від випромінювань, під ред. Н.Г. Гусева, М.: Вища школа, 1989, 512 с.
3. J. Tickner, On the choice of estimators for the use with universal detector response functions, presented at Conference "Monte Carlo Method: Versatility Unbounded in a Dynamic World", Chattanooga, Tennessee, April 17-21, 2005, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL (2005).
4. Пакет програм LSRM-2000. Інструкція користувача. - п. Менделєєве Солнечногорського р-ну Московської обл.: ДП "ВНИИФТРИ", ТОВ "ЛСРМ", див. Також <http://www.lsrn.ru>[4].
5. Бази даних у захисті навколишнього середовища. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни. ОДЕКУ, Одеса..
6. ПГП, е, ДОО в повітрі робочих приміщень в залежності від хімічних сполук і ядерно-фізичних властивостей Sr-90 і 137Cs, МЗУА і МЗА цих радіонуклідів на робочому місці.