

# ЗАГАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО РЕТРОСПЕКТИВНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ДОЗ ОПРОМІНЕННЯ НА КРИШТАЛИК ОКА МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ УМОВ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ АВАРІЇ НА ЧАЕС

**П.Б.Арясов, В.В.Чумак**

НДІ радіаційного захисту АТН України, вул. Мельникова, 53, Київ, 04050  
e-mail: apb@leed1.kiev.ua

У доповіді представлено загальний підхід до ретроспективної оцінки доз бета-опромінення, а також описано дозиметричну модель, що дозволяє оцінювати дози бета-опромінення для умов ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС. Метою досліджень було визначення індивідуалізованих коефіцієнтів переходу від гамма- до бета-доз на кришталік ока. Розроблено дозиметричну модель, що враховує особливості спектру та геометрії джерела, анатомічні особливості ока та різноманітні умови опромінення учасників ліквідації. Проаналізовано та враховано основні дозоутворюючі фактори, що впливають на згаданий коефіцієнт. Як основний інструмент для проведення розрахунків використано спеціалізований програмний пакет MCNP-4B та комбіновані методики (аналітичні та стохастичні).

## **Вступ**

Для умов ліквідації наслідків аварії (ЛНА) на ЧАЕС суттєвий внесок до загальної дози опромінення кришталіка ока становила бета-компонента випромінювання. Так, відповідно до літературних посилань [1], у ряді приміщень внесок бета-компоненти становив 90% протягом декількох років після аварії. Проте, поруч із достовірно задокументованими дозами гамма-опромінення, фактичні записи про дози бета-опромінення для учасників ЛНА відсутні. При цьому оцінка доз бета-опромінення є одним із складних завдань дозиметрії. Труднощі, що виникають при його розв'язанні, пов'язані з низкою чинників, а саме: суттєве послаблення бета-випромінювання речовиною та, як наслідок, залежність дози на органи від енергії бета-випромінювача, відстані до джерела, та особливо геометрії опромінення, яка істотно залежить від характеру робіт та індивідуальної поведінки учасника ЛНА.

Загальний підхід до ретроспективної оцінки доз бета-опромінення у даному випадку полягає у відновленні доз бета-опромінення на підставі їх зв'язку з відомими дозами гамма-опромінення. Так, для відомих умов опромінення (геометрія опромінення та радіонуклідний склад джерела, так званий сценарій опромінення) існує певний зв'язок між дозами гамма- та бета-опромінення. Метою проведених досліджень є побудова моделі, що дозволяє отримати коефіцієнти переходу від доз гамма- до доз бета-опромінення, та відновлення доз бета-опромінення на кришталік ока на підставі відносно добре вимірних доз гамма-опромінення. При цьому необхідно брати до уваги основні дозоутворюючі чинники, що впливають на згаданий коефіцієнт, а саме: геометрію опромінення, характеристики джерела, індивідуальну поведінку працівника, анатомічні особливості ока, радіонуклідний склад та його зміну з часом.

## Матеріали та методи

Існує два підходи розрахунку доз бета-опромінення: аналітичний, з використанням функцій точкового джерела, та використання стохастичного моделювання методом Монте-Карло. У представленій роботі застосовано комбіновані методики – як аналітичні, так і стохастичні. Моделювання та проведення розрахунків виконувалося за допомогою спеціалізованого програмного пакету MCNP-4B. Основною складністю при застосуванні даного методу є те, що він має велику похибку на далеких відстанях (в областях кінцевого польоту часток). Проте при наявності сучасного комп'ютерного обладнання, цього недоліку можна уникнути шляхом, наприклад, збільшення кількості "історій" та використання спеціальних методів, передбачених можливостями пакету MCNP-4B (картка «важливості» для окремих структур простору завдання) або комбінацією того, що перелічено вище. При цьому для випадків, розглянутих у даній роботі (відстань до 8 м від джерела), моделювання бета-доз не є досить складним завданням. Так, похибка при розрахунках бета-доз становила менш ніж 5% (в окремих випадках – 10%), для гамма-опромінення похибка становила 2%. Необхідно підкреслити також максимальну адекватність моделі джерела, що побудована в MCNP-4B, та реальній ситуації: кут вильоту  $\beta$  та  $\gamma$  часток був хаотичним. Засобами MCNP проводилось урахування майже всіх різноманітних процесів у речовині (фотоефект, народження пар, Комптон-ефект та виникнення Оже-електронів).

Серед усіх можливостей та переваг обраного методу, що перелічені вище, окремо необхідно виділити можливість розбиття одного глобального джерела на множину парціальних і проведення моделювання для кожного з них окремо, з наступною згорткою та нормуванням. Фактично, ця можливість дозволяє створювати т.зв. джерела зі складною геометрією (поверхня джерела не належить одній

площині), та тим самим проводити розрахунки для реальних умов/сценаріїв опромінення. Наприклад, для випадку, коли роботи виконуються всередині приміщення, необхідно враховувати опромінення не лише з підлоги, а й зі стін. Оскільки подібна геометрія опромінення зустрічалася досить часто при виконанні робіт з ЛНА, у модель було закладено два типи геометрії джерел: вертикальна та горизонтальна.

## Опис моделі

Математичний фантом людини, обраний для моделювання, являв собою стандартний циліндричний фантом, заповнений тканиноеквівалентним матеріалом (водою) з окремо виділеними макетами (моделями) ока. На рис. 1 наведено параметри фантома людини в площинах XY та XZ. Циліндричний фантом мав діаметр 24 см та висоту 170 см. На рівні 145–150 см (середньостатистична висота розташування ока у людини) знаходяться 4 макети ока, кожен з яких складається з «передньої камери» та «кришталіка», та має форму циліндричних шарів, що обмежені сектором з кутом  $60^\circ$ .

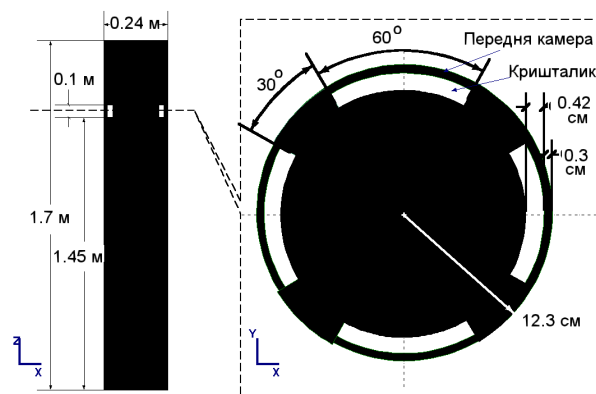


Рис. 1. Параметри фантома людини, використаного при розрахунках.

Моделювалось опромінення від двох типів джерела – горизонтального (підстелена поверхня) та вертикального (забруднені стіни). Горизонтальна площина

являє собою макет підлоги приміщення, вертикальна – макет стін. Обидва макети були розбиті на прямокутники (фасетки), що є елементарними моноенергетичними бета- та гамма-джерелами. Розбиття горизонтальної геометрії джерела складається з трьох рівнів, що відрізняються між собою за відстанню від фантома. Схему розбиття першого рівня наведено на рис. 2. У даному випадку елементарними джерелами є квадрати зі стороною 1 м. Для нумерації та кодування вказаних елементарних джерел використано вектор  $(i, j)$ , що містить координати центру джерела по осях відповідно X та Y.

Окремо було розглянуто випадки, коли опромінення відбувалося на більших за площею або лінійними розмірами майданчиків для виконання робіт (наприклад, роботи на відкритому повітрі, на дахах та всередині будівель, що розташовані на забрудненій території і т.п.). Фактично було закладено можливість моделювання практично будь-якого сценарію опромінення для джерела з розмірами до  $240 \times 240$  м.

Описане розбиття джерела разом із урахуванням осової симетрії побудованого фантома та наявністю чотирьох макетів ока (див. рис. 1) дає можливість проводити розрахунки тільки для  $1/8$  поверхні джерела, дози для решти поверхні визначаються з симетрії задачі. Вказану вище частину поверхні, для якої було проведено розрахунки має нумерацію, наведену на рис. 2. Слід також зазначити, що при моделюванні необхідно враховувати фізичні та хімічні властивості матеріалу, використаного в даному сценарії опромінення. Так, наприклад, джерело може знаходитись як на бетонній підлозі, так і на асфальтовому чи ґрунтовому покритті, що має досить великий вплив на кінцевий результат та враховано в моделі. Як можна бачити з рис. 2, розбиття джерела першого рівня обмежено 8 метрами до фантома. Це обмеження обґрунтовано малим (таким, яким можна знехтувати) внеском у дозу від елементарних джерел, що знаходяться на більшій відстані. По-

передні розрахунки показали, що для максимально можливої (що мала місце у чорнобильській суміші) енергії електронів у  $3.54$  MeV, (ізоотоп  $^{106}\text{Rh}$ ), внесок до дози бета-опромінення на кришталік ока від джерела на відстані 7 метрів становить менш ніж 1%. Для енергії електронів у  $1.5$  MeV ( $^{89}\text{Sr}$ ) подібне обмеження вступає в силу вже на відстані 3 м від джерела.

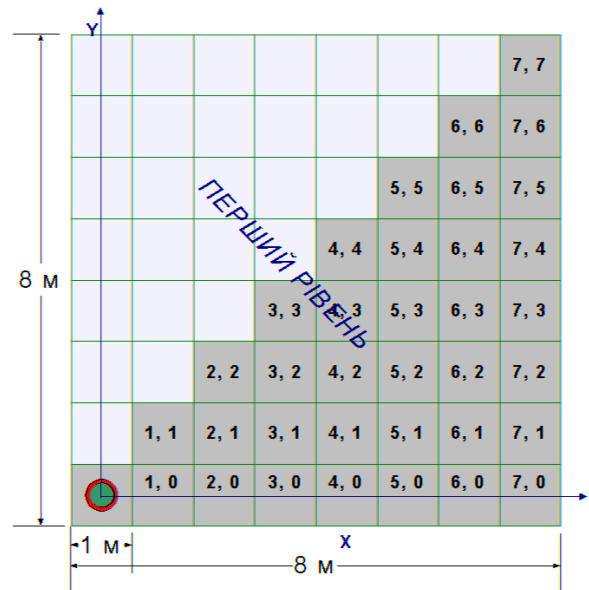


Рис.2. Схема розбиття горизонтальної геометрії джерела першого рівня на елементарні джерела.

Вертикальна геометрія джерела відповідає випадку забруднених стін у приміщенні та за способом розбиття дещо відрізняється від горизонтальної. При нумерації елементарних джерел на стінах було використано вектор  $(i, j)$  з індексом  $W$ , що складається з координат центру джерела по осях відповідно X та Y. При моделюванні стін приміщення елементарні джерела являли собою смужки шириною 1 м та висотою 4 м, що розташовані паралельно осям Y та Z та перпендикулярно площині XY на границях елементарних джерел горизонтальної геометрії, на відстані від 0 до 8 метрів від фантома. На рис. 3 наведено схему розбиття на елементарні джерела вертикальної геометрії макета стіни на відстані 4 м від фантома.



Рис.3. Схема розбиття «вертикальної» геометрії джерела на елементарні джерела, (проекція XY).

Таким чином, комбінування елементарних джерел для двох типів геометрії опромінення, засноване на принципі суперпозиції та адитивності дози, дозволило моделювання практично всіх можливих варіантів геометрії опромінення. З іншого боку, застосування при розрахунках для елементарних джерел моноенергетичних ліній з подальшим їх комбінуванням дозволило моделювання будь-яких енергетичних спектрів джерела опромінення як для гамма-, так і для бета-випромінювачів. При розрахунках моноенергетичних джерел енергія моноліній бета-джерел дорівнювала 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 1.7, 2, 2.8, 3.0, 3.5 MeV. Набір енергетичних ліній для кожного з елементарних джерел визначався залежно від ряду чинників, а саме: ефективності моделювання, відстані до джерела, урахування процесу розсіювання в повітрі. Після отримання результатів для моноенергетичних ліній, з урахуванням того, що бета-спектр являє собою смугу в достатньо широкому інтервалі енергій, було проведено інтерполяцію отриманих розрахункових значень із реальними даними про спектри конкретних нуклідів.

Енергії моноліній гамма-джерел становили 0.02, 0.5, 1.0, 1.5, 1.8 MeV. Гранічні значення залежали від відповідних характеристик ізотопів чорнобильської суміші 0.029 MeV ( $^{132}\text{Te}$ ) та 1.597 MeV ( $^{140}\text{Ba}$ ).

## Результати

Таким чином, розрахунково-аналітичні процедури було розбито на два етапи. На першому етапі визначався вклад до дози на кришталік ока, обумовлений випромінюванням з елементарних моноенергетичних джерел. Для цього було проведено моделювання умов опромінення згідно з побудованою моделлю з використанням спеціалізованого програмного пакету MCNP-4b [4], що ґрунтується на методі Монте-Карло. Результатом першого етапу є розрахункові значення доз гамма- ( $D_\gamma$ ) та бета- ( $D_\beta$ ) опромінення для кожного з описаних вище моноенергетичних елементарних джерел.

На другому етапі для подальшого аналізу, обробки результатів та визначення конверсійного коефіцієнту  $D_\beta/D_\gamma$  було використано математичну модель, що враховувала такі аспекти: 1) відновлення розрахункових доз опромінення для всієї поверхні джерела; 2) проведення процедури апроксимації розрахункових значень для реальних спектрів [2] відповідних нуклідів; 3) урахування фактору зміни радіонуклідного складу з часом (перерахунок активності джерела за законами радіоактивного розпаду з урахуванням утворення дочірніх продуктів, протягом двох років після аварії, з інтервалом у 1 тиждень (168 годин)); 4) розрахунок агрегованих значень  $D_\gamma$  та  $D_\beta$  для джерел складної геометрії та відповідного нуклідного складу.

По завершенні виконання другого етапу було отримано значення конверсійного коефіцієнта  $K$  ( $D_\beta/D_\gamma$ ) для кришталіка ока, що відповідають різноманітним сценаріям опромінення учасників ЛНА на ЧАЕС. На рис. 4 та 5 відповідно наведено залежності  $D_\beta$  і  $D_\gamma$  від часу після аварії за дворічний період та динаміку конверсійного коефіцієнта  $K$ .

Наведені результати відповідають такій геометрії опромінення: кімната з забрудненою підлогою та стінами, висотою 4 метри та з лінійними розмірами  $8 \times 8 \text{ м}^2$ . Працівник знаходиться у куті при-

міщення спиною до найближчої стіни. При цьому в приміщенні були відсутні вікна та було прийнято, що зовнішнього (за межами будинку) гамма-опромінення немає.

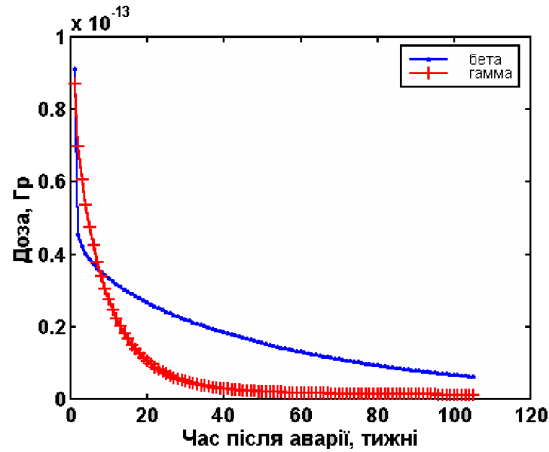


Рис. 4. Залежність доз бета та гамма-опромінення на кришталік ока від часу після аварії.

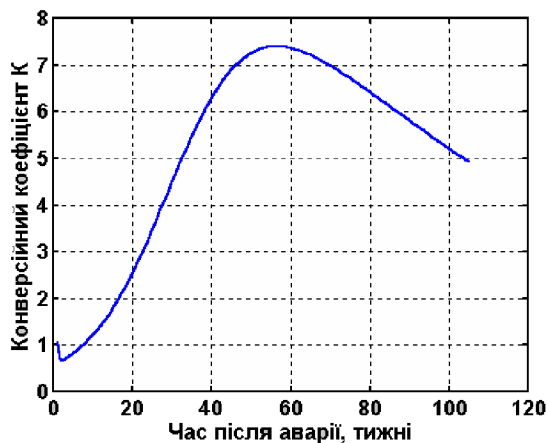


Рис. 5. Динаміка зміни конверсійного коефіцієнту  $K$  після аварії.

Як приклад реального розрахунку дози бета-опромінення на кришталік ока було розглянуто ліквідатора з відомими умовами опромінення, що брав участь у ЛНА та працював у декількох приміщеннях четвертого енергоблоку ЧАЕС у період з 20.07.1986 до 15.08.1986. Відповідно до офіційних даних, доза гамма-опромінення за період робіт становила 25 рентген. Після застосування моделі було отримано індивідуалізований конверсійний коефіцієнт ліквідатора. Для даного випадку доза бета-опромінення становила 0.6 Гр. Як коментар, тут можна додати, що за умов виконання тих же самих робіт, але в період з 20.04.1987 до 15.05.1987, доза бета-опромінення становила б не 0.6, а 1.7 Гр.

## Висновки

Розроблено структуру та побудовано реалістичну модель ретроспективного визначення доз на кришталік ока для умов ЛНА на ЧАЕС.

На підставі побудованої моделі отримано результати для окремих конкретних сценаріїв опромінення з агрегованих коефіцієнтів переходу від доз гамма-опромінення до доз бета-опромінення.

Отримані результати мають велике значення з точки зору проведення подальших епідеміологічних досліджень, таких як, наприклад, виявлення променевої катаракти та встановлення зв'язку виникнення катаракт кришталіка ока з отриманою дозою опромінення.

## Література

1. D.P.Osanov, V.P. Krjuchkov, A.I. Shaks, in: Chernobyl papers. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies, Eds.: S.E.Mervin and M.I.Balovnov (Research Enterprises Publishing Segment, New York, 1990), Vol. 1, p. 313–348.
2. ICRU report 56, Dosimetry of external beta rays for radiation protection, (Bethesda, Maryland, USA, 1997).
3. D.P.Osanov, Radiation Protection Dosimetry, 74, 235 (1997).
4. MCNP-4b. Users manual, LA-12625M (1997).

5. Радиационная дозиметрия. Под ред. Дж. Хайна и Г. Браунелла (Издательство иностранной литературы, Москва, 1958).

## **GENERAL APPROACH TO RETROSPECTIVE DOSE ASSESSMENT ON EYE LENS USING MONTE CARLO METHOD FOR THE CONDITIONS OF THE CHORNOBYL ACCIDENT**

**P.B.Aryasov, V.V.Chumak**

Radiation Protection Institute, Ukr. Acad. Techn. Sci.,  
Melnikova St. 53, Kyiv, 04050  
e-mail: apb@leed1.kiev.ua

A general approach to retrospective assessment of beta exposure doses and description of dosimetric model for restoration of beta exposure doses for the condition of the Chernobyl consequences is presented. The studies were aimed at the determination of individualized transfer coefficients from beta to gamma doses on the eye lens. A dosimetric model was developed taking into account the specific features of the source spectrum and geometry, anatomic features of the eye, and different conditions of irradiation for different people. The main dose-forming factors that influence the transfer coefficient were analyzed and taken into account. A specialized MCNP-4b software was used as a main instrument for the modelling and calculation along with combined (analytical and stochastic) methods.