

# NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH MÁY TÍNH ĐỂ XÁC ĐỊNH BỀ DÀY LỚP CHẾT ĐẦU DÒ GERMANIUM SIÊU TINH KHIẾT SỬ DỤNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN KẾT HỢP VỚI MCNP5

VÕ XUÂN AN

Phòng Thanh tra - Pháp chế, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh  
voxuanan@iuh.edu.vn

**Tóm tắt.** Thuật toán di truyền ngày càng được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực để xác định giá trị tối ưu cho bộ tham số của các hệ thống phức tạp. Đặc biệt, trong nghiên cứu hệ phổ kế gamma, việc kết hợp thuật toán di truyền với chương trình mô phỏng Monte Carlo MCNP5 đã cho phép xác định kích thước hình học tối ưu từ hộp đựng mẫu cho đến cấu trúc buồng chỉ che chắn. Công trình này đề xuất nghiên cứu xây dựng chương trình máy tính để xác định bề dày lớp chết của đầu dò germanium siêu tinh khiết loại p sử dụng thuật toán di truyền kết hợp với MCNP5. Kết quả cho thấy rằng phổ gamma tính toán và phổ gamma thực nghiệm trùng khớp tốt với nhau. Mặt khác, phương pháp này cho phép tự động tính toán trên các máy tính cá nhân thông thường từ khâu chuẩn bị các thông số đầu vào cho đến việc thực hiện quá trình tìm kiếm giá trị tối ưu của bề dày lớp chết nên tiết kiệm đáng kể thời gian tính toán và kết quả tính toán có độ tin cậy cao.

**Từ khoá.** Thuật toán di truyền, MCNP5, đầu dò germanium siêu tinh khiết, lớp chết.

## A NEW PROGRAMME FOR DETERMINING THE DEADLAYER OF THE HPGe DETECTOR USING GENETIC ALGORITHM COUPLE WITH MCNP5

**Abstract.** More and more genetic algorithms have been widely used to find optimal or near-optimal parameters of complex systems which otherwise would take a lifetime to solve. Specially, in researching gamma spectrometers, combination of the genetic algorithm and the Monte Carlo based MCNP5 code allowed determining from geometry dimensions to lead shielding structures. This paper proposes a new programme for determining the thickness of the dead layer of the p-type HPGe detector using genetic algorithm coupled with MCNP5. The results showed that there was a good agreement between experimental and simulated spectra. On the other hand, this method allowed automatically computing by personal computers from preparing input parameters to finding optimal or near-optimal solutions of the deadlayer thickness so saving considerable computing time and having highly reliable results.

**Keywords.** Genetic algorithm, MCNP5, high purity germanium detector, deadlayer.

### 1 MỞ ĐẦU

Trong nhiều năm qua, hệ phổ kế gamma dùng đầu dò germanium siêu tinh khiết được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như phân tích định tính và phân tích định lượng hàm lượng các chất trong mẫu đo [1], đo đặc hoạt độ phóng xạ trong nghiên cứu phóng xạ môi trường [2], đo đặc số liệu hạt nhân [3], ... Hệ phổ kế gamma dùng đầu dò germanium siêu tinh khiết có tuổi thọ sử dụng cao, lên đến hàng chục năm [4]. Các thông số vật lý và thành phần vật liệu của hệ phổ kế cũng thay đổi theo thời gian là nguyên nhân dẫn đến làm giảm hiệu suất ghi [5]. Đã có nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng sự giảm hiệu suất ghi theo thời gian chủ yếu là do sự tăng bề dày lớp chết của đầu dò germanium siêu tinh khiết. Đây là lớp n+ được bố trí ở mặt trên và mặt bên tinh thể germanium đối với đầu dò đồng trục loại p, hoặc được bố trí ở mặt trong hốc tinh thể đối với đầu dò giếng loại p [6, 7, 8, 9]. Bề dày lớp chết thường được xác định bằng thực nghiệm đo phổ gamma kết hợp với tính toán dựa vào các chương trình mô phỏng Monte Carlo, chẳng hạn như MCNP [10], GEANT [11], GESPECOR [12], DETEFF [13], EGS [14]. Trong đó, bề dày lớp chết được điều chỉnh sao cho hiệu suất tính toán từ phổ gamma mô phỏng phù hợp với hiệu suất đo đặc thực nghiệm. Công việc này được thực hiện thủ công và mất nhiều thời gian trong việc chuẩn bị các thông số đầu vào của tệp input của chương trình mô phỏng. Hơn nữa, các chương trình mô phỏng Monte Carlo ngày càng hoàn chỉnh, mang lại kết quả có độ tin cậy cao, cho phép kết hợp với thuật toán di truyền để giải quyết nhiều bài toán khác nhau trong lĩnh vực vật lý hạt nhân [15, 16]. Công trình này đề xuất nghiên cứu xây dựng chương trình máy

tính sử dụng thuật toán di truyền kết hợp với chương trình mô phỏng Monte Carlo MCNP5 để tự động hóa quá trình xác định bề dày lớp chết của đầu dò germanium siêu tinh khiết.

## 2 PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1 Input của chương trình MCNP5

MCNP5 là chương trình máy tính được phát triển trong hơn 50 năm qua [17]. Đây là chương trình đa mục đích, ứng dụng phương pháp Monte Carlo để mô phỏng quá trình tương tác của các hạt neutron, photon và electron riêng biệt hoặc kết hợp neutron/photon, neutron/photon/electron, photon/electron và electron/photon với môi trường vật chất. Trong đó năng lượng neutron thay đổi từ  $10^{-11}$  MeV đến 20 MeV, năng lượng photon và electron thay đổi từ 1 keV to 1000 MeV. Nguồn số liệu hạt nhân với năng lượng liên tục được lấy từ các cơ sở dữ liệu như ENDL (Evaluated Nuclear Data Library), ACTL (Activation Library) và T-2 (Applied Nuclear Science Group).

Cấu trúc một input của chương trình MCNP5 gồm:

Dòng thông báo tiêu đề và thông tin về vấn đề nghiên cứu

Các thẻ ô (cell cards) để định nghĩa khối hình học, tính chất và thành phần vật liệu

...

Dòng trống

Các thẻ mặt (surface cards) để định nghĩa các mặt hình học

...

Dòng trống

Các thẻ dữ liệu (data cards) bao gồm các thẻ kiểu hạt tương tác (mode cards), các thẻ vật liệu (material cards), các thẻ nguồn (source cards), các thẻ truy xuất kết quả (tally cards), ...

Để đảm bảo tính chính xác của kết quả mô phỏng, đòi hỏi các thông tin cấu trúc hình học, tính chất và thành phần vật liệu của các thành phần hệ phổ kế gamma phải được mô tả càng chi tiết càng tốt. Trên thực tế, hệ phổ kế gamma bao gồm nhiều khối chức năng nhưng chỉ có khối đầu dò ảnh hưởng đáng kể đến kết quả phổ gamma mô phỏng. Trong đó, tương tự đối với các lớp vật liệu khác của đầu dò, bề dày lớp chết được mô tả bằng thông số kích thước hình học của các thẻ mặt và thông số cấu trúc hình học của các thẻ ô tương ứng. Để giảm thời gian tính toán nhưng cũng đảm bảo số đếm thống kê của đỉnh năng lượng gamma quan tâm, một số kỹ thuật rút gọn của MCNP5 được sử dụng gồm năng lượng cắt của photon và mode p. Với mode p, kiểu hạt tham gia tương tác với vật chất chỉ có photon, còn quá trình electron được sinh ra và tương tác với vật chất được mô phỏng theo mô hình gần đúng TTB (thick target bremsstrahlung). Kết quả phân bố độ cao xung (phổ gamma) được truy xuất bằng thẻ phân bố năng lượng độ cao xung F8 và thẻ xử lý đặc biệt FT8 với lựa chọn GEB (Gaussian Energy Broadening).

### 2.2 Thuật toán di truyền

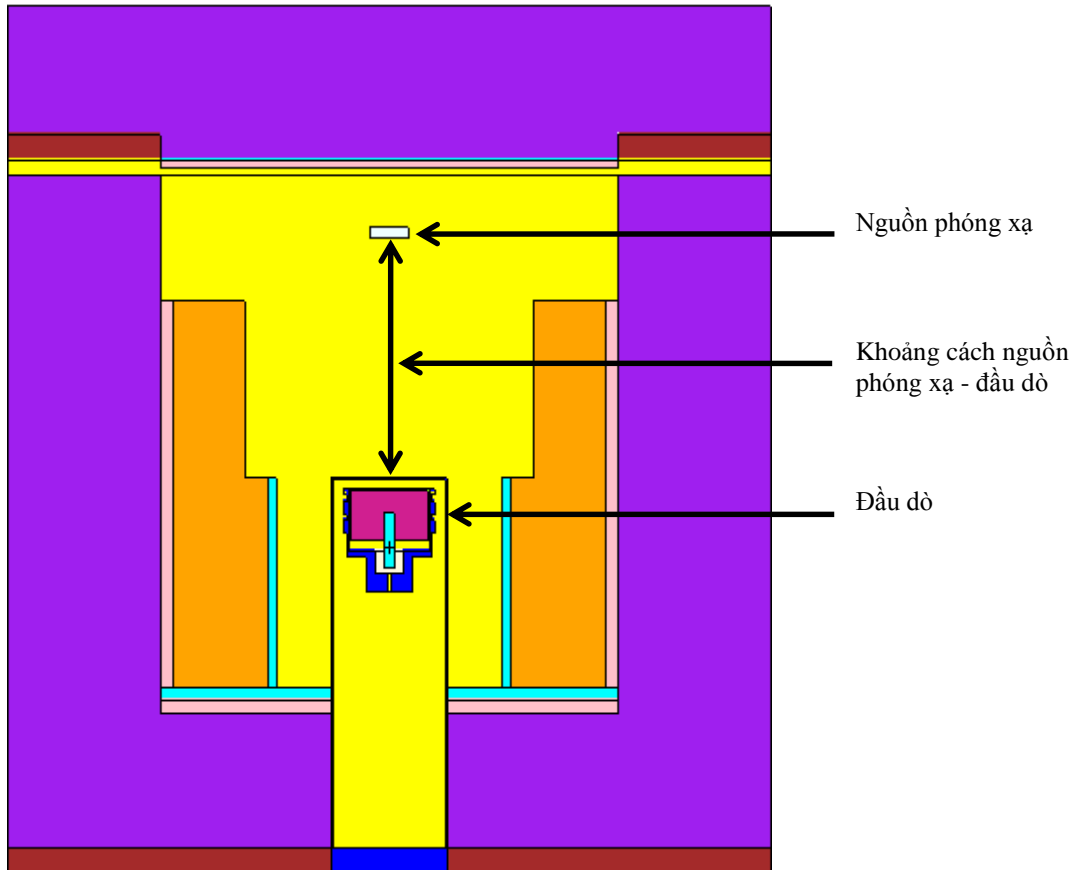
Thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA) là phương pháp tính toán tối ưu dựa theo cơ chế tiến hoá của tự nhiên. Đây là phương pháp đơn giản về mặt tính toán nhưng rất hiệu quả trong quá trình tìm kiếm lời giải tối ưu [18]. Mặt khác, do trong quá trình thực hiện với thủ tục tìm kiếm song song nên về cơ bản nó ít bị tác động bởi điều kiện ban đầu và không gian tìm kiếm không bị giới hạn. Phương pháp này được tiến hành từ một quần thể ban đầu bao gồm một số cá thể xác định. Mỗi cá thể được mã hoá như một nhiễm sắc thể tương ứng với một lời giải khả thi thuộc không gian tìm kiếm của bài toán. Quần thể ban đầu được tạo ra ngẫu nhiên trên toàn bộ không gian tìm kiếm và được biến hoán để hình thành các thế hệ mới, tuân theo các quy luật di truyền dựa trên cơ sở nguyên lý Darwin về đấu tranh sinh tồn (phép chọn lọc) và tái hợp (phép lai và phép đột biến) để có những cá thể tốt nhất. Thực vậy, để hình thành thế hệ kế tiếp các cá thể được lựa chọn dựa trên cơ sở độ thích nghi của chúng. Những cá thể có độ thích nghi tốt hơn sẽ có nhiều cơ hội tồn tại ở thế hệ kế tiếp là cơ sở của phép chọn lọc. Bên cạnh phép chọn lọc còn có hai cơ chế đóng góp quan trọng vào quá trình di truyền đó là phép lai và phép đột biến. Phép lai thực hiện việc chuyển đổi ngẫu nhiên giữa các đoạn nhiễm sắc thể của hai cá thể bố mẹ để tạo ra các cá thể con cháu, còn phép đột biến làm biến đổi ngẫu nhiên tại một số vị trí của nhiễm sắc thể. Thuật toán di truyền được lặp lại cho đến khi đạt được kết quả mong muốn. Việc kết thúc quá trình tìm kiếm lời giải tối ưu tùy thuộc vào số chu kỳ tiến hoá được xác định trước, xác suất biến đổi của các toán tử di truyền và giá trị cho trước của hàm mục tiêu (độ thích nghi).

### 2.3 Bố trí thực nghiệm

Hệ phổ kế gamma phòng thấp đặt tại Trung tâm Hạt nhân Thành phố Hồ Chí Minh sử dụng đầu dò

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH MÁY TÍNH ĐỂ XÁC ĐỊNH BỀ DÀY LỚP CHẾT ĐẦU DÒ 77 GERMANIUM SIÊU TINH KHIẾT SỬ DỤNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN KẾT HỢP VỚI MCNP5

germanium siêu tinh khiết loại p (HPGe - High Purity Germanium) GC1518 của hãng Mirion Technologies (Canberra), Hoa Kỳ gồm buồng chì, đầu dò, nguồn phóng xạ và hệ thống điện tử [19]. Nhằm tránh mất mát số đếm trong đỉnh năng lượng gamma quan tâm do hiện tượng trùng phùng, nguồn phóng xạ  $^{137}\text{Cs}$  với một vạch năng lượng 661,6 keV được lựa chọn sử dụng. Nguồn phóng xạ  $^{137}\text{Cs}$  được đặt dọc theo trục của đầu dò và cách bề mặt đầu dò là 5 cm, 10 cm và 15 cm như Hình 1.



Hình 1: Bố trí thực nghiệm đo phổ gamma với nguồn phóng xạ đặt dọc theo trục và bên trên đỉnh của đầu dò, được mô phỏng bằng chương trình MCNP5.

## 2.4 Phương pháp tính toán

Đối với các bài toán xác định lời giải tối ưu bằng thuật toán di truyền, vấn đề quan trọng là phải xây dựng được hàm mục tiêu, biến quyết định và điều kiện ràng buộc (để xác định không gian tìm kiếm). Trong công trình này, hàm mục tiêu được thiết lập dựa trên cơ sở đánh giá tỉ số diện tích đỉnh năng lượng gamma được tính toán bằng chương trình MCNP5 đối với một giá trị bề dày lớp chết và diện tích đỉnh năng lượng gamma được xác định bằng thực nghiệm. Bề dày lớp chết của đầu dò sẽ được xác định khi tỉ số nói trên tiến đến 1 và hàm mục tiêu được trình bày như sau:

$$f(x) \equiv \frac{S_{\text{cal}}(x)}{S_{\text{exp}}} \rightarrow 1 \quad (1)$$

trong đó:

-  $S_{\text{cal}}(x)$  là diện tích đỉnh năng lượng gamma 661,6 keV được tính toán bằng MCNP5,  $S_{\text{exp}}$  là diện tích đỉnh năng lượng gamma 661,6 keV được xác định bằng thực nghiệm. Diện tích đỉnh năng lượng gamma  $S$  được xác định như sau [20]:

$$S = G - B \quad (2)$$

với  $G$  là diện tích đỉnh năng lượng gamma kể cả phông và  $B$  là diện tích phông liên tục thuộc vùng quan tâm được tính theo công thức [20]:

$$B = \left(\frac{N}{2n}\right) (B_1 + B_2) \quad (3)$$

với  $N$  là số kênh thuộc vùng quan tâm,  $n$  là số kênh thuộc vùng liên tục bên trái và bên phải vùng quan tâm,  $B_1$  là tổng số đếm vùng liên tục bên trái và  $B_2$  là tổng số đếm vùng liên tục bên phải.

Độ lệch chuẩn  $\sigma_s$  của diện tích đỉnh năng lượng gamma  $S$  được tính như sau [20]:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_B^2} = \sqrt{G + \left(\frac{N}{2n}\right)^2 (B_1 + B_2)} \quad (4)$$

-  $x$  là bề dày lớp chết của đầu dò. Đây là biến quyết định với điều kiện ràng buộc (không gian tìm kiếm) nằm trong khoảng  $0,350 \text{ mm} \leq x \leq 3,350 \text{ mm}$ . Với độ chính xác đến 4 số lẻ ở phần thập phân, mỗi giá trị của  $x$  được mã hoá bằng một số nhị phân gồm 15 bit.

Theo đề nghị của Kenneth A. De Jong [21], các thông số của thuật toán di truyền được lựa chọn bao gồm: xác suất lai là 0,6; xác suất đột biến là 0,001 và kích thước quần thể là 50. Chương trình tính toán viết bằng ngôn ngữ lập trình DIGITAL Visual Fortran 6 [22], chạy trên máy tính cá nhân sử dụng bộ vi xử lý Intel Core i7 với lưu đồ thuật toán được trình bày trong Hình 2 và được tóm tắt trong 12 bước như sau:

Bước 1: Khởi tạo ngẫu nhiên quần thể ban đầu.

Bước 2: Mỗi chuỗi nhị phân tương ứng với một giá trị của biến quyết định  $x$  (lời giải  $x$ ) hay cá thể trong quần thể được chuyển đổi thành số thực tương ứng thuộc miền xác định của điều kiện ràng buộc (không gian tìm kiếm) của bài toán.

Bước 3: Từ các lời giải  $x$ , tính giá trị thông số của thẻ mặt 55 (theo hướng bán kính của tinh thể germanium) và của thẻ mặt 64 (theo hướng trục của tinh thể germanium).

Bước 4: Gán các giá trị thông số của thẻ mặt 55 và của thẻ mặt 64 vào input của chương trình MCNP5.

Bước 5: Chạy chương trình MCNP5 để mô phỏng phổ gamma đối với lời giải  $x$  tương ứng. Căn cứ vào phổ gamma mô phỏng để tính toán diện tích đỉnh năng lượng gamma 661,6 keV.

Bước 6: Dựa trên cơ sở hàm mục tiêu để đánh giá độ thích nghi của cá thể hay lời giải  $x$  tương ứng.

Bước 7: Lặp lại từ bước 2 đến bước 6 cho đến khi tất cả các cá thể trong quần thể đều được đánh giá.

Bước 8: Kiểm tra điều kiện dừng của bài toán, giá trị của hàm mục tiêu  $f(x) = 1,000 \pm 0,001$ .

Bước 9: Tiến hành chọn lọc và đưa các cá thể vào bể sinh sản để hình thành thế hệ mới.

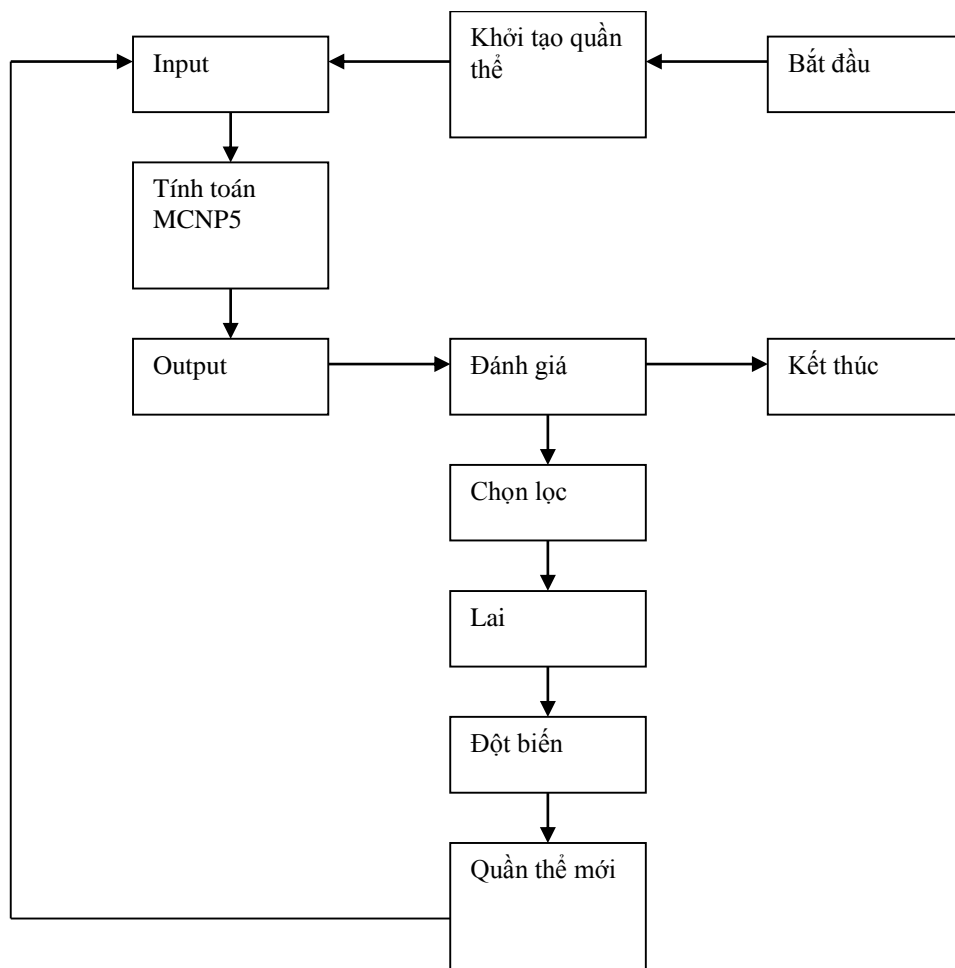
Bước 10: Tiến hành phép lai giữa các cặp cá thể từ bể sinh sản.

Bước 11: Tiến hành phép đột biến tại một số vị trí được chọn ngẫu nhiên từ tất cả các cá thể trong bể sinh sản.

Bước 12: Hình thành quần thể mới và quá trình tìm kiếm lời giải tối ưu được lặp lại từ bước 2.

Chương trình máy tính để xác định bề dày lớp chết của đầu dò germanium sử dụng thuật toán di truyền kết hợp với chương trình mô phỏng Monte Carlo MCNP5 được thực hiện đối với 3 khoảng cách nguồn - đầu dò 5 cm, 10 cm và 15 cm. Do đó, chương trình tính toán được thực hiện 3 lần chạy tương ứng với 3 khoảng cách nguồn - đầu dò này. Theo điều kiện dừng hay tiêu chuẩn hội tụ với sai số của giá trị hàm mục tiêu là 0,001 thì phải thực hiện gần 10000 lần tính toán bằng chương trình MCNP5. Tuy nhiên, với tốc độ xử lý của máy tính sử dụng bộ vi xử lý Intel Core i7 hiện có, vấn đề tính toán nói trên là hoàn toàn có thể thực hiện được và không có gì trở ngại.

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH MÁY TÍNH ĐỂ XÁC ĐỊNH BỀ DÀY LỚP CHẾT ĐẦU DÒ 79 GERMANIUM SIÊU TINH KHIẾT SỬ DỤNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN KẾT HỢP VỚI MCNP5



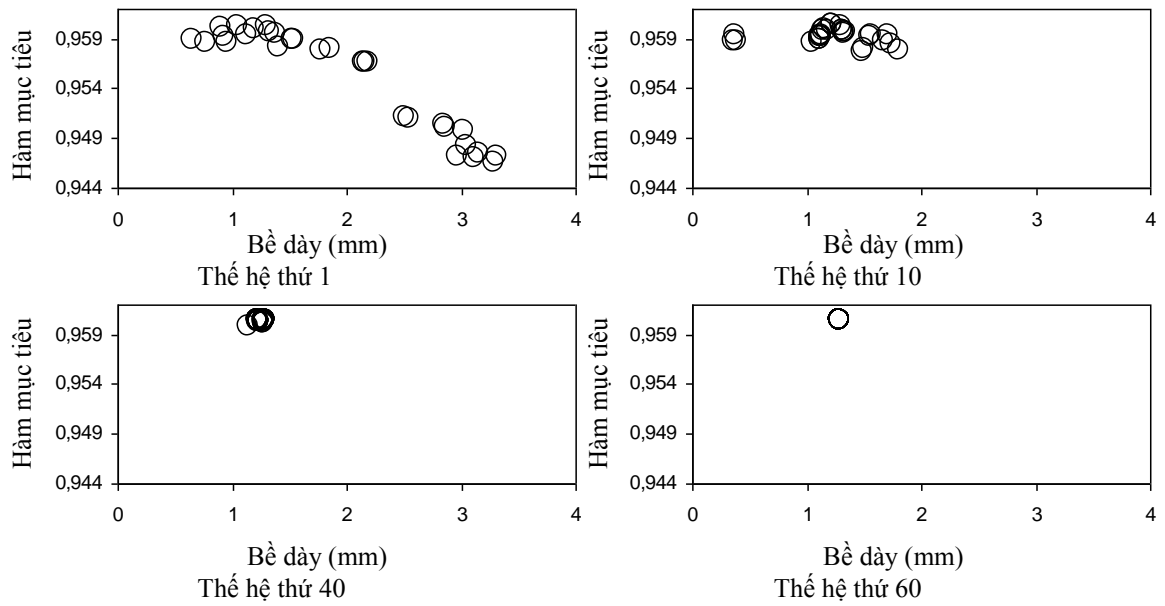
Hình 2: Lưu đồ thuật toán xác định bề dày lớp chết của đầu dò sử dụng thuật toán di truyền kết hợp với chương trình mô phỏng Monte Carlo MCNP5.

### 3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

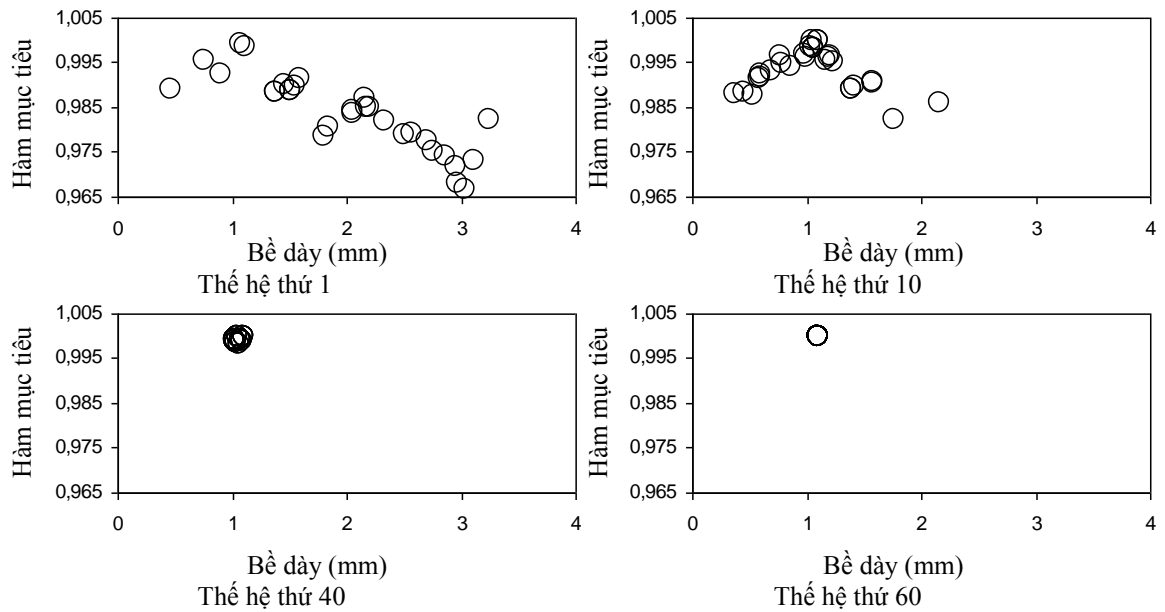
Chương trình máy tính để xác định bề dày lớp chết của đầu dò germanium sử dụng thuật toán di truyền kết hợp với chương trình mô phỏng Monte Carlo MCNP5 được thực hiện đối với 3 khoảng cách nguồn <sup>137</sup>Cs - đầu dò 5 cm, 10 cm và 15 cm được tiến hành hoàn toàn độc lập, kết quả tính toán được trình bày trong Bảng 1; các Hình 3, Hình 4 và Hình 5.

Bảng 1: Bề dày lớp chết của đầu dò germanium được xác định ở thế hệ 1, 10, 40 và 60.

Khoảng cách nguồn <sup>137</sup> Cs - đầu dò	Bề dày lớp chết của đầu dò germanium tính bằng mm			
	Thế hệ thứ 1	Thế hệ thứ 10	Thế hệ thứ 40	Thế hệ thứ 60
5 cm	1,96	1,25	1,28	1,28
10 cm	2,00	1,05	1,10	1,10
15 cm	1,76	1,33	1,16	1,16
Trung bình ± Độ lệch chuẩn	1,91 ± 0,13	1,21 ± 0,14	1,18 ± 0,10	1,18 ± 0,10

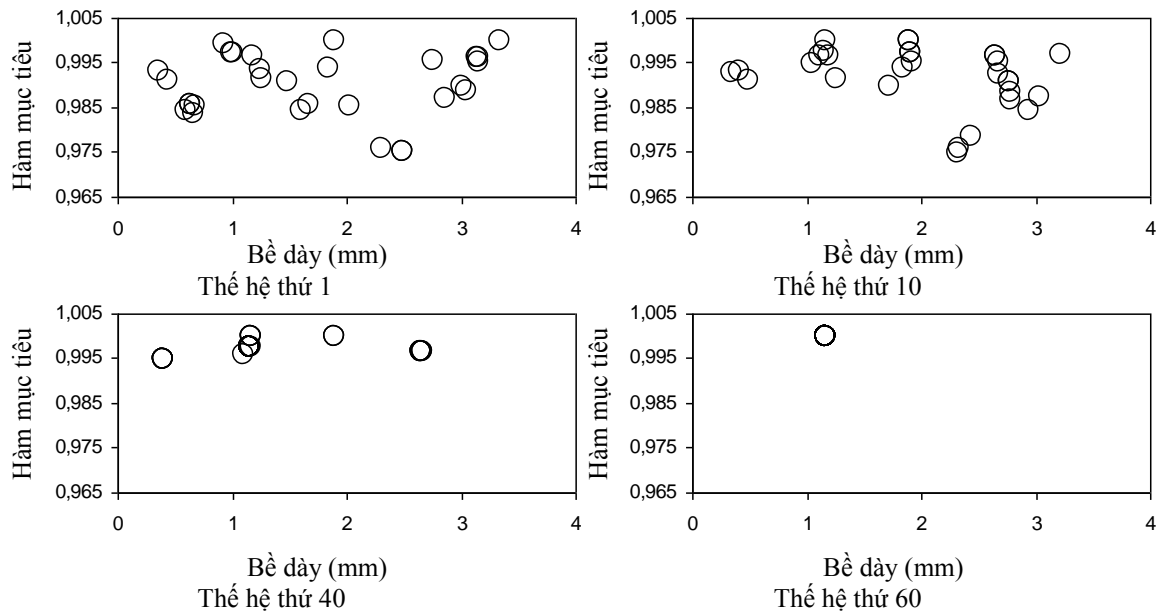


Hình 3: Đồ thị biểu diễn đáng điệu của quần thể ở thế hệ thứ 1, 10, 40 và 60 đối với trường hợp khoảng cách nguồn  $^{137}\text{Cs}$  - đầu dò 5 cm.



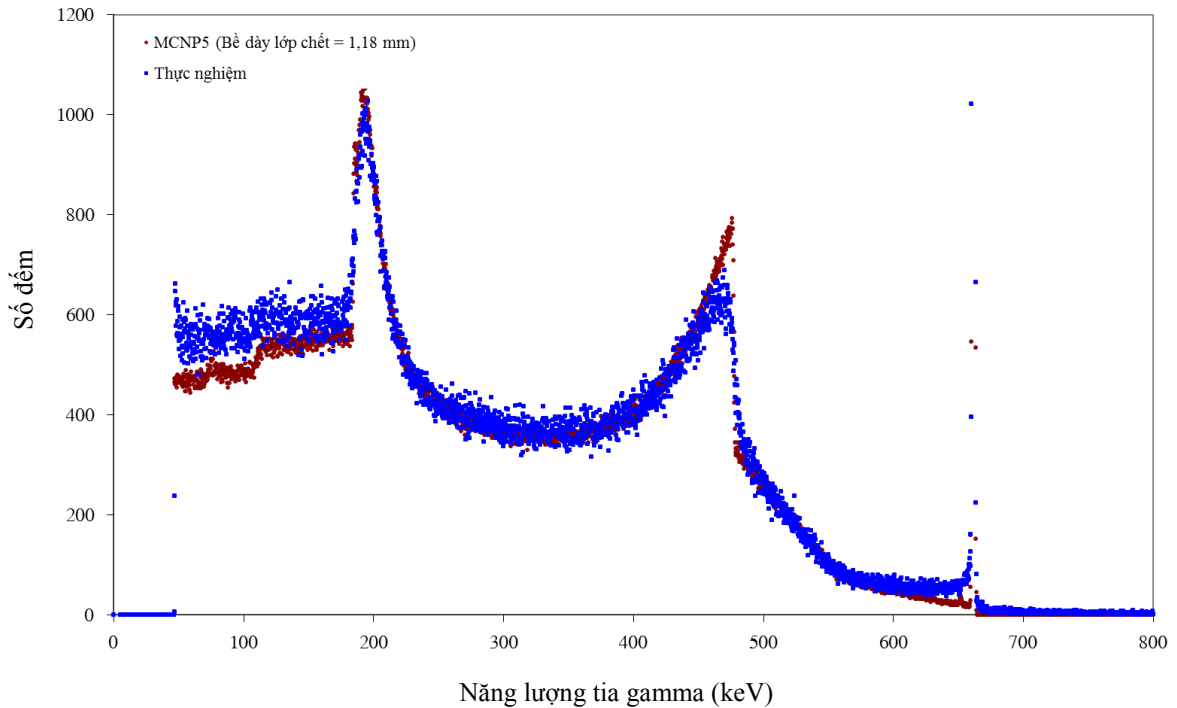
Hình 4: Đồ thị biểu diễn đáng điệu của quần thể ở thế hệ thứ 1, 10, 40 và 60 đối với trường hợp khoảng cách nguồn  $^{137}\text{Cs}$  - đầu dò 10 cm.

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH MÁY TÍNH ĐỂ XÁC ĐỊNH BỀ DÀY LỚP CHẾT ĐẦU DÒ 81 GERMANIUM SIÊU TINH KHIẾT SỬ DỤNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN KẾT HỢP VỚI MCNP5



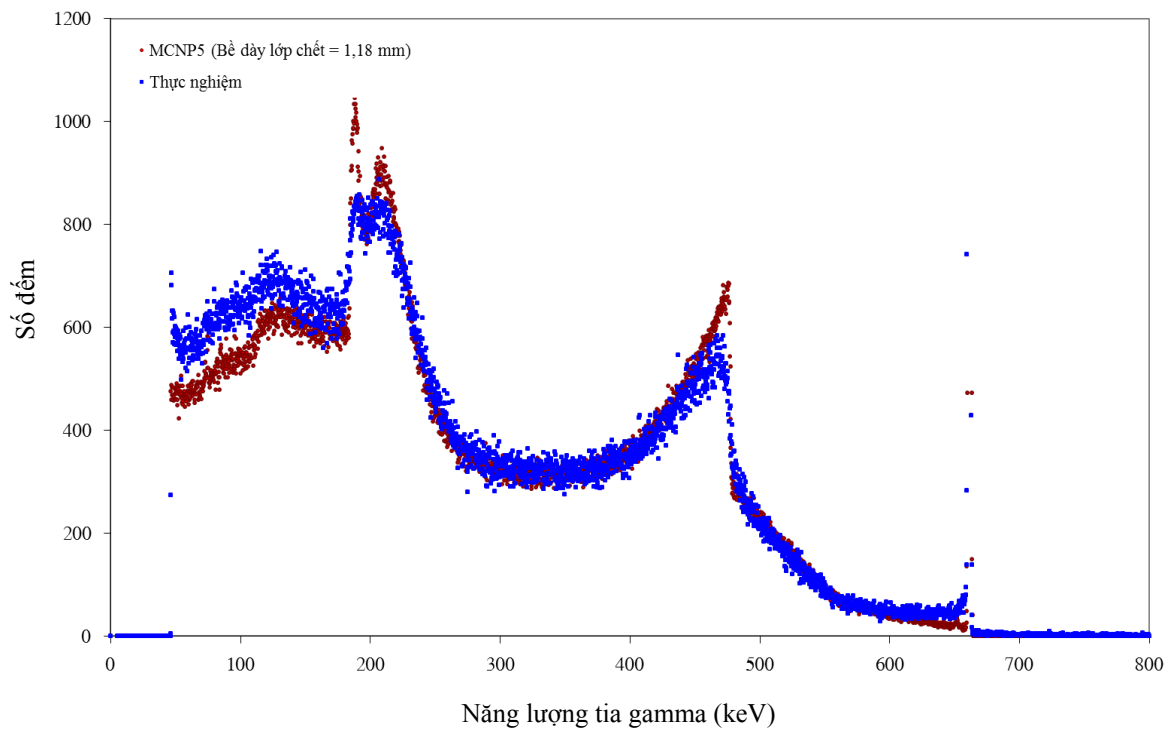
Hình 5: Đồ thị biểu diễn dáng điệu của quần thể ở thế hệ thứ 1, 10, 40 và 60 đối với trường hợp khoảng cách nguồn  $^{137}\text{Cs}$  - đầu dò 15 cm.

Gán các giá trị thông số của thẻ mặt 55 và của thẻ mặt 64 vào input của chương trình MCNP5 tương ứng với bề dày lớp chết của đầu dò được xác định và trình bày ở góc dưới bên phải Bảng 1 và bằng  $1,18 \pm 0,10$  mm đối với 3 khoảng cách nguồn  $^{137}\text{Cs}$  - đầu dò 5 cm, 10cm và 15 cm cho thấy phổ gamma tính toán phù hợp tốt với phổ gamma thực nghiệm như trong các Hình 6, 7, 8. Hơn nữa, kết quả bề dày lớp chết của đầu dò này phù hợp với kết quả xác định bằng phương pháp thủ công như trong công trình [23] trước đây của chúng tôi.

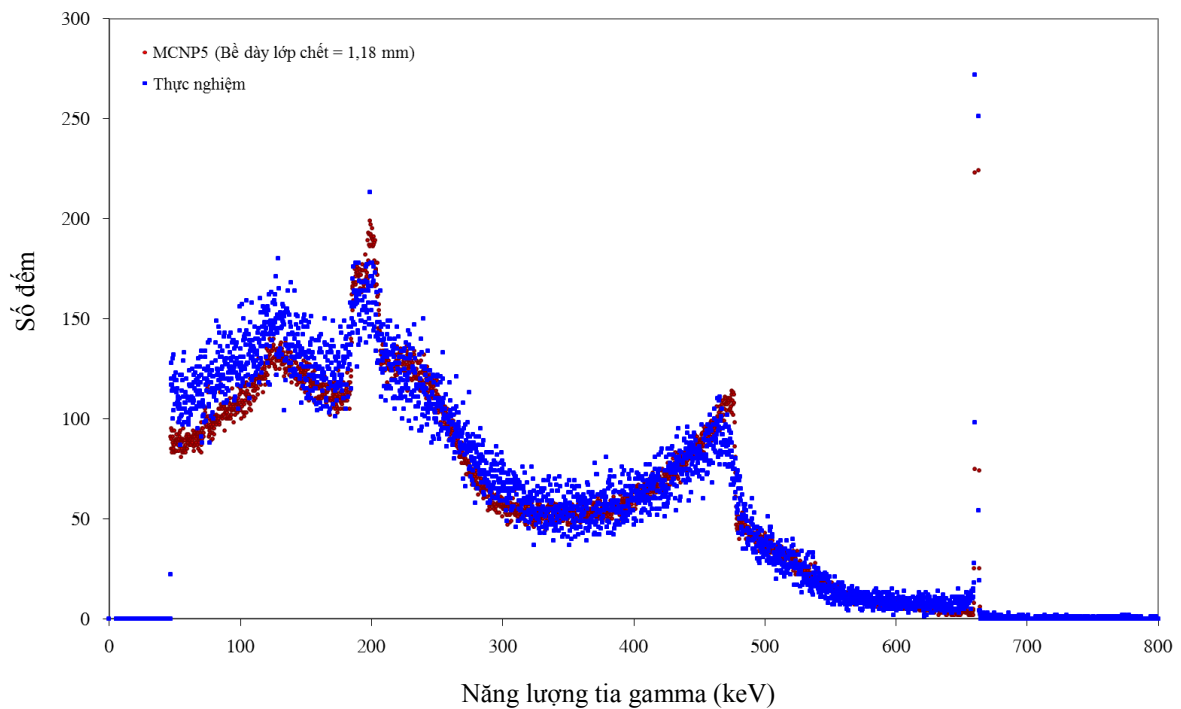


82 NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH MÁY TÍNH ĐỂ XÁC ĐỊNH BỀ DÀY LỚP CHẾT ĐẦU DÒ GERMANIUM SIÊU TINH KHIẾT SỬ DỤNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN KẾT HỢP VỚI MCNP5

Hình 6: So sánh phổ gamma thực nghiệm (màu xanh) và phổ gamma mô phỏng bằng chương trình MCNP5 (màu đỏ) đối với trường hợp nguồn  $^{137}\text{Cs}$  đặt cách đầu dò 5 cm.



Hình 7: So sánh phổ gamma thực nghiệm (màu xanh) và phổ gamma mô phỏng bằng chương trình MCNP5 (màu đỏ) đối với trường hợp nguồn  $^{137}\text{Cs}$  đặt cách đầu dò 10 cm.



Hình 8: So sánh phổ gamma thực nghiệm (màu xanh) và phổ gamma mô phỏng bằng chương trình MCNP5 (màu đỏ) đối với trường hợp nguồn  $^{137}\text{Cs}$  đặt cách đầu dò 15 cm.



#### 4 KẾT LUẬN

Việc nghiên cứu xây dựng chương trình máy tính sử dụng thuật toán di truyền kết hợp với chương trình mô phỏng Monte Carlo MCNP5 đã mở ra một hướng mới trong việc xác định các thông số vật lý của hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò bán dẫn germanium siêu tinh khiết có cấu trúc hình học, tính chất và thành phần vật liệu phức tạp. Theo đó, chương trình máy tính cho phép thực hiện quá trình tính toán hoàn toàn tự động trên cơ sở hàm mục tiêu, biến quyết định và điều kiện ràng buộc được lựa chọn thích hợp. Các thông số đầu vào trong input của chương trình MCNP5 cũng được cập nhật tự động sau mỗi chu kỳ tiến hóa của thuật toán di truyền. Cùng với thủ tục để chạy chương trình MCNP5 được kết nối với chương trình chính nên sau mỗi chu kỳ tiến hóa một quần thể mới được hình thành và tự động lặp lại quá trình tính toán. Nhờ đó, đã tiết kiệm thời gian đáng kể và tránh được sai sót so với trường hợp tính toán thủ công. Bằng phương pháp này, bề dày lớp chết của đầu dò bán dẫn germanium siêu tinh khiết (HPGe) GC1518 của hệ phổ kế gamma đặt tại Trung tâm Hạt nhân Thành phố Hồ Chí Minh là  $1,18 \pm 0,10$  mm. Kết quả này phù hợp tốt với kết quả đã được xác định trước đây của chúng tôi là 1,16 mm. Mặt khác, chương trình máy tính này được xây dựng có tính mở, có thể áp dụng đối với các hệ phổ kế gamma dùng đầu dò HPGe loại p tương tự. Thời gian tính toán có thể rút ngắn nhiều lần nếu như việc tính toán được tiến hành trên máy tính nhiều bộ xử lý hoạt động song song.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Z. Mohammad et al., Designing and producing large-volume liquid gamma-ray standard sources for low radioactive pollution measurements of seawater samples by comparison between experimental and simulation results, *Measurement*, vol. 90, pp. 412-417, 2016.
- [2] R. Breier et al., Environmental radionuclides as contaminants of HPGe gamma-ray spectrometers: Monte Carlo simulations for Modane underground laboratory, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 190, pp. 134-140, 2018.
- [3] T. G. Greaney et al., Applications of HPGe-detected high energy gamma rays toward quantifying neutron emission rates and <sup>234</sup>U enrichment in UF<sub>6</sub> cylinders, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol. 972, DOI:10.1016/j.nima.2020.163912, 2020.
- [4] M. Hult et al., Determination of homogeneity of the top surface deadlayer in an old HPGe detector, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 147, pp. 182-188, 2019.
- [5] J. Ródenas et al., Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 496, pp. 390-399, 2003.
- [6] T. T. H. Loan et al., Determination of the dead-layer thickness for both p- and n-type HPGe detectors using the two-line method, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 315, pp. 95-101, 2018.
- [7] H. Jiang et al., Measurement of the dead layer thickness in a p-type point contact germanium detector, *Chinese Physics C*, vol. 40, DOI:10.1088/1674-1137/40/9/096001, 2016.
- [8] S. M. Modarresi et al., A method for considering the spatial variations of dead layer thickness in HPGe detectors to improve the FEPE calculation of bulky samples, *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 130, pp. 291-296, 2017.
- [9] S. E. S. Aline, HPGe well detector calibration procedure by MCNP5 Monte Carlo computer code, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 46, pp. 213-217, 2012.
- [10] A. Elanique et al., Dead layer thickness characterization of an HPGe detector by measurements and Monte Carlo simulations, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 70, pp. 538-542, 2012.
- [11] J. Allison et al., Geant4 toolkit for the simulation of the passage of particles through matter, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 835, pp. 186-225, 2016.

- [12] O. Sima, D. Arnold, C. Dovlete, GESPECOR: A versatile tool in gamma-ray spectrometry, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 248, pp. 359-364, 2001.
- [13] N. Cornejo Diaz, M. Jurad Vargas, DETEFF: An improved Monte Carlo computer program for evaluating the efficiency in coaxial gamma-ray detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 586, pp. 204-210, 2008.
- [14] Canada National Research Council, EGSnrc: software tool to model radiation transport, [www.nrc-cnrc.gc.ca](http://www.nrc-cnrc.gc.ca), 2018.
- [15] S. M. Zamzhamian et al., Determining of the optimized dimensions of the Marinelli beaker containing source with inhomogeneous emission rate by using genetic algorithm coupled with MCNP and determining distribution type by neural networks, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 157, DOI:10.1016/j.apradiso.2020.109039, 2020.
- [16] N. Q. Huy et al., A study for improving detection efficiency of an HPGe detector based gamma spectrometer using Monte Carlo simulation and genetic algorithms, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 70, pp. 2695-2702, 2012.
- [17] X-5 Monte Carlo Team, MCNP - A General Purpose Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory, [mcnp.lanl.gov/pdf\\_files/la-ur-03-1987.pdf](http://mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-03-1987.pdf), 2003.
- [18] Nguyễn Đình Thúc và các tác giả, Trí tuệ nhân tạo - Lập trình tiến hóa, *Nhà xuất bản Giáo Dục*, 2001.
- [19] Mirion Technologies (Canberra), Inc., Germanium Detectors - User's Manual, [www.mirion.com/products/germanium-detectors](http://www.mirion.com/products/germanium-detectors), 2019.
- [20] Canberra Industries, Inc., Genie 2000 customization tools manual, *Canberra Industries, Inc.*, pp. 443-446, 2000.
- [21] Kenneth A. De Jong, An analysis of behavior of a class of genetic adaptive systems, Ph.D. Thesis, *University of Michigan*, 1975.
- [22] Digital Equipment Corporation, DIGITAL Visual Fortran - Version 6.0A: Language Reference, *Digital Equipment Corporation, Maynard, Massachusetts*, 1998.
- [23] N. Q. Huy et al., Study on the increase of inactive germanium layer in a high-purity germanium detector after a long time operation applying MCNP code, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 573 pp. 384-388, 2007.

Ngày nhận bài: 07/10/2020

Ngày chấp nhận đăng: 10/03/2021