

Nghiên cứu giới hạn phát hiện hoạt độ của hệ phổ kế gamma với các cấu hình che chắn khác nhau

- Lê Quang Vương
- Võ Hoàng Nguyên
- Huỳnh Đình Chương
- Lâu Minh Phúc
- Trần Thiện Thanh
- Châu Văn Tạo

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 19 tháng 12 năm 2016, nhận đăng ngày 30 tháng 10 năm 2017)

TÓM TẮT

Trong kỹ thuật phân tích hoạt độ bằng hệ phổ kế gamma, kết quả phân tích phải lớn hơn giới hạn phát hiện hoạt độ (MDA). Việc cải thiện khả năng giảm nhiễu là một trong những phương pháp phổ biến để giảm MDA, tăng khả năng phân tích hoạt độ của hệ phổ kế gamma. Trong công trình này, chúng tôi thiết kế buồng chì có cấu hình gồm 5 cm chì, lót thêm 2 mm đồng bên trong, MDA của ^{40}K (1460,8 keV), ^{232}Th

(^{208}Tl - 2614,5 keV) và ^{238}U (^{214}Pb - 352 keV; ^{214}Bi - 609,3 keV; ^{214}Bi - 1764,5 keV) giảm thấp nhất 2,6 lần, cao nhất 4,24 lần. Mặt khác, với cấu hình che chắn cải tiến này, MDA của ^{238}U nhỏ hơn hoạt độ phân tích từ các mẫu đất bề mặt tại Việt Nam. Điều đó chứng tỏ hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò NaI(Tl) với cấu hình che chắn cải tiến phù hợp cho việc phân tích hoạt độ ^{238}U trong mẫu môi trường.

Từ khóa: giới hạn phát hiện hoạt độ, hệ phổ kế gamma, phân tích hoạt độ

MỞ ĐẦU

Phông phóng xạ môi trường bao gồm phóng xạ tự nhiên từ các đồng vị như ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U (và sản phẩm phân rã của chúng), bức xạ vũ trụ,... Khi đo phổ gamma của mẫu phân tích sẽ có đóng góp của phông và làm kết quả phân tích hoạt độ bị sai lệch so với hoạt độ thực tế của đồng vị có trong mẫu. Do đó, việc nghiên cứu giảm phông môi trường được xem là phương pháp quan trọng để nâng cao độ chính xác cho kỹ thuật phân tích hoạt độ bằng hệ phổ kế gamma.

Đầu dò nhấp nháy NaI(Tl) hoặc bán dẫn Germanium siêu tinh khiết (HPGe) thường được đặt trong một buồng chì che chắn để hạn chế phóng xạ môi trường. Cấu hình che chắn thường là nhiều loại vật liệu xếp chồng khít lên nhau có số bậc nguyên tử Z giảm dần (từ ngoài vào trong).

Vojtyla và Povinec [1] đã tiến hành khảo sát phông với nhiều cấu hình che chắn khác nhau và nhận thấy rằng khi tăng kích thước, hoặc bề dày lớp che chắn, hoặc lót thêm lớp vật liệu có số bậc nguyên tử Z thấp hơn sẽ làm gia tăng tương tác của muon vũ trụ với vật liệu che chắn, và khi đó phổ phông do thành phần vũ trụ gây ra cao hơn. Ngoài ra, để hạn chế muon từ bức xạ vũ trụ đến đầu dò thì hệ phổ kế cần thiết kế dạng đối xứng phồng hoặc đặt sâu dưới lòng đất.

Tiêu chuẩn TCVN 9421 về điều tra, đánh giá và thăm dò khoáng sản – phương pháp gamma mặt đất đề nghị phương pháp cửa sổ (WA, Windows Analysis) với các đỉnh năng lượng của ^{238}U (^{214}Bi – 1764,5 keV), ^{232}Th (^{208}Tl – 2614,5 keV) và ^{40}K (^{40}K – 1460,8 keV) để xác định hoạt

độ riêng của ^{238}U , ^{232}Th và ^{40}K trong đất, đá và trong thân khoáng sản, phục vụ cho điều tra mẫu địa chất, thăm dò khoáng sản và nghiên cứu môi trường [2]. N.Q. Huy và cộng sự tiến hành phân tích hoạt độ riêng các mẫu đất bề mặt của 63 tỉnh thành trên lãnh thổ Việt Nam [3]. Kết quả cho thấy hoạt độ riêng ^{238}U trong khoảng 15,02 – 121,58 Bq.kg⁻¹, ^{232}Th là 16,07 – 129,16 Bq.kg⁻¹ và ^{40}K là 10,47 – 1085,39 Bq.kg⁻¹.

Giới hạn phát hiện hoạt độ (MDA, Minimum Detectable Activity) được định nghĩa là hoạt độ thấp nhất mà hệ phổ kế gamma phát hiện được. Giới hạn này càng thấp thì khả năng phân tích hoạt độ của hệ phổ kế gamma càng tốt. Việc giảm MDA bằng cách cải tiến cấu hình che chắn thường được nghiên cứu bằng thực nghiệm [4, 5] hoặc mô phỏng [6, 7]. Trần Thiện Thanh và cộng sự [8] đã khảo sát ảnh hưởng phong phóng xạ tự nhiên với hai cấu hình không che chắn và có che chắn của hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò HPGe. Kết quả cho thấy MDA của ^{238}U , ^{232}Th và ^{40}K giảm từ 1,09 đến 5,03 lần. L. Done và cộng

sự [9] tiến hành khảo sát MDA của hệ phổ kế gamma với đầu dò HPGe đặt trong buồng chì che chắn dày 10 cm, mẫu phân tích có cấu trúc hình học và hàm lượng phóng xạ khác nhau. Kết quả cho thấy MDA là một hàm của thời gian đo và không phụ thuộc vào độ nhạy của đầu dò.

Trong công trình này, chúng tôi xác định tỉ lệ giảm phong của hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò NaI(Tl) với nhiều cấu hình che chắn khác nhau. Từ đó, cấu hình che chắn cải tiến được sử dụng để xác định MDA của ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K từ 10 mẫu địa chất. Kết quả phân tích cho thấy MDA nhỏ hơn hoạt độ riêng của các mẫu đất bề mặt tại Việt Nam [3].

VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

Thiết bị

Mẫu chuẩn (RGU-1, RGTh-1, RGK-1) và mẫu phân tích (M1, M2, ..., M10) được nén chặt trong các hộp nhựa đường kính 7,3 cm; chiều cao mẫu 2,0 cm; khối lượng và mật độ mẫu được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Khối lượng và mật độ khối của các mẫu chuẩn và mẫu phân tích

Tên mẫu	Khối lượng (g)	Mật độ khối (g.cm ⁻³)
RGU-1	130	1,55
RGTh-1	119	1,42
RGK-1	135	1,62
M1	140	1,68
M2	116	1,39
M3	132	1,57
M4	136	1,63
M5	132	1,57
M6	138	1,65
M7	144	1,72
M8	145	1,74
M9	152	1,81
M10	118	1,40

Hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò NaI(Tl) có tinh thể nháp nháy là một khối hình trụ, kích thước 7,62 x 7,62 cm được cung cấp bởi hãng Canberra (USA). Đầu dò NaI(Tl) được kết nối trực tiếp với ống Osprey™ [13], bên trong tích hợp bộ cấp cao thế (HVPS), bộ tiền khuếch đại, bộ phân tích đa kênh (MCA) và các thiết bị cần thiết khác để hỗ trợ ghi nhận phổ. Ống Osprey™ được kết nối với máy tính bằng một cổng USB để điều khiển và thu dữ liệu. Phần mềm Genie2k được sử dụng để ghi nhận và xử lý phổ gamma của phòng phóng xạ môi trường và phổ gamma của các mẫu chuẩn.

Buồng chì che chắn thường được chế tạo dạng trụ, với các vật liệu có số bậc nguyên tử Z giảm dần (từ ngoài vào trong). Khi đặt đầu dò trong một lớp chì che chắn dày 10 cm, phòng phóng xạ môi trường giảm 1000 lần và có thể phát hiện được nguồn phóng xạ yếu hơn 30 lần với độ chính xác thống kê như nhau [5]. Tuy nhiên, nhóm tác giả [5] cũng chỉ ra rằng, khi bề dày che chắn chỉ tăng lên thì đóng góp của bức xạ vũ trụ vào phổ gamma cũng tăng theo. Điều này ảnh hưởng đến độ chính xác của các kết quả phân tích hoạt độ tại các đỉnh năng lượng thấp. Do đó, với mục tiêu tiết kiệm chi phí mà vẫn đảm bảo khả năng phân tích hoạt độ của hệ phổ kế gamma, đặc biệt là các đồng vị có hoạt độ thấp trong mẫu môi trường, chúng tôi thiết kế các cấu hình che chắn với lớp chì có bề dày tăng dần. Trong công trình này, ba cấu hình đầu tiên được thiết kế gồm:

Cấu hình 1: không che chắn.

Cấu hình 2: che chắn chì 3 cm, lót thêm lớp đồng 2 mm bên trong.

Cấu hình 3: che chắn chì 5 cm, đồng 2 mm bên trong.

Các cấu hình khác sẽ được tiếp tục nghiên cứu trong thời gian tiếp theo.

Phương pháp

MDA phụ thuộc vào hiệu suất ghi của đầu dò tại năng lượng E (keV), cường độ phát gamma của đồng vị phóng xạ, thời gian đo phổ, độ phân giải năng lượng của đầu dò, cấu trúc hình học của mẫu, bức xạ vũ trụ,... MDA thường được tính bằng công thức:

$$MDA = \frac{L_D}{\varepsilon \times I_\gamma \times t_B \times m_s} \quad (1)$$

Phổ gamma đo bằng đầu dò NaI(Tl) thường có phân bố Gauss, gọi m là số kênh của vùng chọn, n là tổng số kênh của đỉnh Gauss khi ROIs đỉnh (Genie2k), khoảng giá trị phân tích với độ tin cậy 95 % thì giới hạn đo L_D (Detection Limit) [10] được xác định bằng công thức:

$$L_D = 2,71 + 3,29 \sqrt{B \left(1 + \frac{n}{2m}\right)} \quad (2)$$

Thông thường, một đỉnh Gauss được chọn tốt sẽ chứa 99,7 % số đếm thống kê của đỉnh [11], tương ứng với $n = 2m$ và $B = G - N_B$ là diện tích nền dưới phòng. Khi đó, giới hạn phát hiện hoạt độ (MDA) được tính bằng công thức:

$$MDA = \frac{2,71 + 4,65 \sqrt{(G - N_B)}}{\varepsilon \times I_\gamma \times t_B \times m_s} \quad (3)$$

Trong công trình này, chúng tôi sử dụng bộ mẫu chuẩn RGU-1 (4940 ± 30 Bq.kg⁻¹), RGK-1 (14000 ± 400 Bq.kg⁻¹) và RGTh-1 (3250 ± 90 Bq.kg⁻¹) để xác định hiệu suất ghi:

$$\varepsilon = \frac{N_C}{A_C \times I_\gamma \times t_C \times m_C} \quad (4)$$

Phổ gamma của phòng môi trường và bộ mẫu chuẩn được đo trong cùng thời gian ($t_B = t_C = 86400$ s). Thế (4) vào (3) ta được:

$$MDA = \left[2,71 + 4,65 \sqrt{(G - N_B)} \right] \times \frac{A_C \times m_C}{N_C \times m_s} \quad (5)$$

Trong đó, N_C là diện tích đỉnh phổ gamma của mẫu chuẩn, G và N_B là số đếm tổng và diện tích đỉnh phổ phòng, A_C là hoạt độ riêng của mẫu chuẩn, m_C và m_s là khối lượng của mẫu chuẩn và mẫu phân tích (Bảng 1). Sai số tương đối của giới

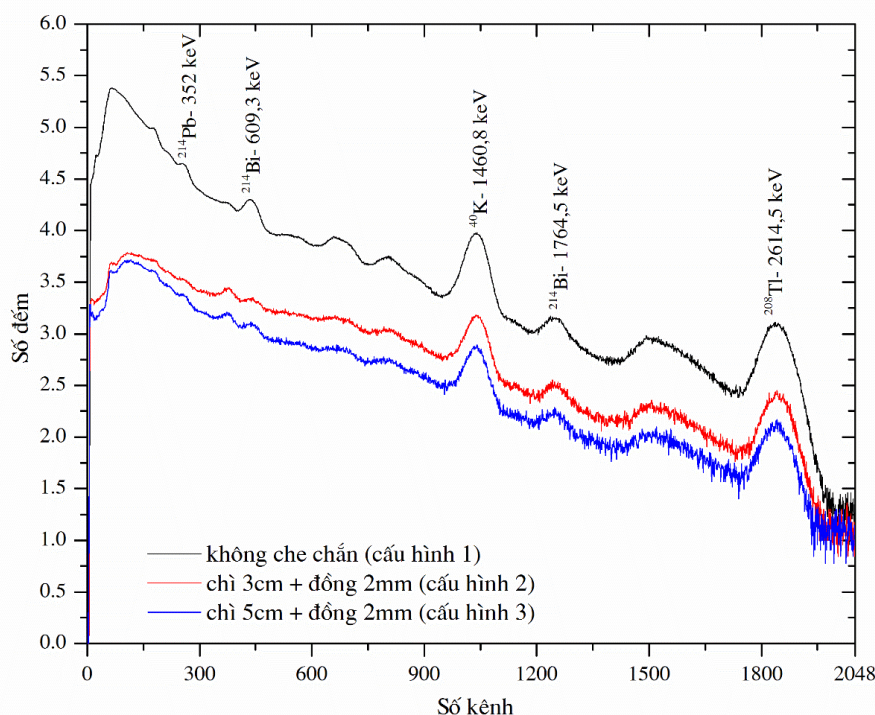
hạn phát hiện hoạt độ được tính toán bằng công thức truyền sai số [12].

KẾT QUẢ

Kết quả phân tích giới hạn phát hiện hoạt độ

Các đồng vị phóng xạ ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K có thời gian sống dài (lần lượt là $T_{238\text{U}} = 4,468 \times 10^9$ năm, $T_{232\text{Th}} = 1,405 \times 10^{10}$ năm, $T_{40\text{K}} = 1,25 \times 10^9$ năm) nên tồn tại lâu trên trái đất. Đồng vị ^{40}K phát

gamma ở năng lượng 1460,8 keV, chuỗi ^{238}U và chuỗi ^{232}Th có vùng năng lượng gamma trải rộng từ 0–3000 keV. Phổ phóng môi trường đo bằng hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò NaI(Tl) với ba cấu hình che chắn để dàng phát hiện sự tồn tại của của các đồng vị này (Hình 1). Số đếm toàn phổ của cấu hình 2 giảm 15,1 lần và cấu hình 3 giảm 23 lần so với cấu hình 1.



Hình 1. Phổ phóng xạ môi trường với ba cấu hình che chắn

Giới hạn phát hiện hoạt độ (MDA) của ^{40}K (^{40}K - 1460,8 keV), chuỗi ^{238}U (thông qua sản phẩm phân rã ^{214}Pb - 352 keV; ^{214}Bi - 609,3 keV; ^{214}Bi - 1764,5 keV), ^{232}Th (^{208}Tl - 2614,5 keV) được xác định với các cấu hình trên. Kết quả phân tích MDA của chuỗi ^{238}U với cấu hình che chắn gồm 5 cm chì có lót thêm 2 mm đồng (cấu

hình 3) giảm 4,24 lần ở đỉnh năng lượng 352 keV (^{214}Pb); giảm 3,53 lần ở đỉnh 609,3 keV (^{214}Bi); và giảm 2,80 lần ở đỉnh 1764,5 keV (^{214}Bi) (Bảng 2). MDA của chuỗi ^{232}Th giảm 2,60 lần và MDA của ^{40}K giảm 2,70 lần giữa cấu hình 3 và cấu hình 1 (Bảng 3).

Bảng 2. MDA (Bq.kg⁻¹) của ²³⁸U với ba cấu hình che chắn

Tên mẫu	²¹⁴ Pb - 352 keV			²¹⁴ Bi - 609,3 keV			²¹⁴ Bi - 1764,5 keV		
	MDA ⁽¹⁾	MDA ⁽²⁾	MDA ⁽³⁾	MDA ⁽¹⁾	MDA ⁽²⁾	MDA ⁽³⁾	MDA ⁽¹⁾	MDA ⁽²⁾	MDA ⁽³⁾
M1	23,66±0,01	6,83± 0,01	5,59± 0,01	24,43± 0,02	9,43± 0,02	6,93± 0,02	41,55±0,09	20,52±0,09	14,86±0,09
M2	28,59± 0,02	8,25±0,02	6,75±0,02	29,52± 0,03	11,39±0,02	8,37±0,02	50,20± 0,11	24,79± 0,11	17,95± 0,11
M3	25,25± 0,02	7,28± 0,02	5,96± 0,01	26,08± 0,02	10,06± 0,02	7,40±0,02	44,35±0,10	21,90±0,10	15,86±0,10
M4	24,38±0,02	7,03±0,01	5,76±0,01	25,18± 0,02	9,72±0,02	7,14±0,02	42,82± 0,10	21,14± 0,10	15,31±0,09
M5	25,24± 0,02	7,28± 0,02	5,96± 0,01	26,07± 0,02	10,06±0,02	7,39±0,02	44,33±0,10	21,89±0,10	15,86±0,10
M6	23,99±0,01	6,92±0,01	5,66±0,01	24,77± 0,02	9,56±0,02	7,02± 0,02	42,13± 0,09	20,80±0,09	15,07± 0,09
M7	23,07± 0,01	6,65± 0,01	5,45± 0,01	23,82± 0,02	9,19±0,02	6,76±0,02	40,51±0,09	20,01± 0,09	14,49±0,09
M8	22,86±0,01	6,59±0,01	5,40±0,01	23,60± 0,02	9,11±0,02	6,69±0,02	40,14± 0,09	19,82±0,09	14,36± 0,09
M9	21,89± 0,01	6,32± 0,01	5,17± 0,01	22,61± 0,02	8,72±0,02	6,41±0,02	38,45±0,09	18,99± 0,09	13,75±0,09
M10	28,23± 0,02	8,14±0,02	6,66±0,02	29,16± 0,02	11,25±0,02	8,27± 0,02	49,59± 0,11	24,49±0,11	17,73±0,11
Hoạt độ riêng đo được tại Việt Nam [3]	15,02 (Bq.kg ⁻¹) đến 121,58 (Bq.kg ⁻¹)								

Trong đó MDA⁽¹⁾, MDA⁽²⁾, MDA⁽³⁾ tương ứng với cấu hình 1, cấu hình 2, cấu hình 3. Và 23,66(1) nghĩa là 23,66 ± 0,01 (Bq.kg⁻¹).

Bảng 3. MDA (Bq.kg⁻¹) của ²³²Th và ⁴⁰K với ba cấu hình che chắn.

Tên mẫu	²³² Th			⁴⁰ K		
	²⁰⁸ Tl - 2614,5 keV			⁴⁰ K - 1460,8 keV		
	MDA ⁽¹⁾	MDA ⁽²⁾	MDA ⁽³⁾	MDA ⁽¹⁾	MDA ⁽²⁾	MDA ⁽³⁾
M1	23,77 ± 0,12	12,34 ± 0,12	9,21± 0,11	77,13 ± 0,19	37,90 ± 0,16	28,10 ± 0,15
M2	28,72 ± 0,15	14,91 ± 0,14	11,13 ± 0,14	93,18 ± 0,23	45,79 ± 0,20	33,95 ± 0,19
M3	25,36 ± 0,13	13,17 ± 0,12	9,83 ± 0,12	82,31 ± 0,21	40,45 ± 0,17	29,99 ± 0,16
M4	24,49 ± 0,13	12,71 ± 0,12	9,49 ± 0,12	79,48 ± 0,20	39,06 ± 0,17	28,95 ± 0,16
M5	25,36 ± 0,13	13,16 ± 0,12	9,83 ± 0,12	82,29 ± 0,21	40,44 ± 0,17	29,98 ± 0,16
M6	24,09 ± 0,13	12,51 ± 0,12	9,34 ± 0,11	78,19 ± 0,20	38,42 ± 0,16	28,49 ± 0,16
M7	23,17 ± 0,12	12,03 ± 0,11	8,98 ± 0,11	75,20 ± 0,19	36,95 ± 0,16	27,39 ± 0,15
M8	22,96 ± 0,12	11,92 ± 0,11	8,90 ± 0,11	74,50 ± 0,19	36,61 ± 0,16	27,14 ± 0,15
M9	21,99 ± 0,11	11,42 ± 0,11	8,52 ± 0,10	71,36 ± 0,18	35,07 ± 0,15	26,00 ± 0,14
M10	28,36 ± 0,15	14,72 ± 0,14	10,99 0,13	92,04 ± 0,23	45,23 ± 0,19	33,53 ± 0,18
Hoạt độ riêng đo được tại Việt Nam [3]	16,07 (Bq.kg ⁻¹) đến 129,16 (Bq.kg ⁻¹)			10,47 (Bq.kg ⁻¹) đến 1085,39 (Bq.kg ⁻¹)		

Trong đó 23,77(12) nghĩa là 23,77 ± 0,22 (Bq.kg⁻¹).

Ngoài ra, MDA của chuỗi ²³⁸U và chuỗi ²³²Th với cấu hình 3 nhỏ hơn hoạt độ riêng của các mẫu đất bề mặt tại Việt Nam (dưới 15,02 Bq.kg⁻¹ đối với ²³⁸U và dưới 16,07 Bq.kg⁻¹ đối với ²³²Th). Điều đó chứng tỏ cấu hình che chắn cải tiến của chúng tôi phù hợp cho việc phân tích hoạt độ chuỗi ²³⁸U và ²³²Th trong các mẫu môi

trường. MDA của ⁴⁰K vẫn chưa giảm đến mức phù hợp (dưới 10,47 Bq.kg⁻¹). Do đó, để phân tích được hoạt độ riêng của ⁴⁰K trong các mẫu hoạt độ thấp cần phải tăng khối lượng mẫu, hoặc tăng bề dày che chắn chì. Điều này đang được chúng tôi quan tâm nghiên cứu và phát triển.

KẾT LUẬN

Hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò nhấp nháy NaI(Tl) với cấu hình buồng chì cải tiến gồm 5 cm chì, lót thêm 2 mm đồng bên trong đã giảm được số đếm nhiễu 23 lần so với cấu hình không che chắn. Ngoài ra, hoạt độ riêng nhỏ nhất (MDA) của chuỗi ^{238}U (thông qua sản phẩm phân rã ^{214}Pb - 352 keV; ^{214}Bi - 609,3 keV; ^{214}Bi - 1764,5 keV) với cấu hình che chắn cải tiến nhỏ hơn hoạt

độ riêng ^{238}U trong các mẫu đất tại Việt Nam [3]. Điều đó chứng tỏ cấu hình che chắn cải tiến của chúng tôi phù hợp để phân tích hoạt độ phóng xạ của ^{238}U trong các mẫu môi trường.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số B2017-18-02.

Study of the minimum detectable activity in gamma-ray spectrometry with various shielding configurations

- Le Quang Vuong
- Vo Hoang Nguyen
- Huynh Dinh Chuong
- Lau Minh Phuc
- Tran Thien Thanh
- Chau Van Tao

University of Science, VNU-HCM

ABSTRACT

In the environmental radioactivity analyzing methods using gamma-ray spectrometry, the natural activities of radionuclides were required to be higher than the minimum detectable activity (MDA). To reduce MDA, one of the popular methods is to improve the ability of reducing the background radiation of the gamma-ray spectrometry. In this work, we designed the shielding configuration with 5 cm lead and 2 mm copper (thickness of walls and top). The MDAs of gamma-ray spectrometer were 2.6–4.24 times

Key words: minimum detectable activity, gamma-ray spectrometry, activity of radionuclides

times for ^{40}K (1460.8 keV), ^{232}Th (^{208}Tl - 2614.5 keV) and ^{238}U (^{214}Pb - 352 keV; ^{214}Bi - 609.3 keV, ^{214}Bi - 1764.5 keV). In the other hand, MDA for ^{238}U with this shielding configuration is smaller than the activity of ^{238}U inside surface soils in Vietnam. These results showed that the gamma spectrometer with NaI(Tl) detector and this shielding configuration was suitable for measurements activity of ^{238}U in the environmental samples.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. P. Vojtyla, P. Povinec, Monte Carlo simulation of background characteristics of low-level HPGe detectors, *Applied Radiation and Isotope* 53, 185–190, (2000).
- [2]. Tiêu chuẩn TCVN 9421 về điều tra, đánh giá và thăm dò khoáng sản – phương pháp gamma mặt đất (2012).
- [3]. N.Q. Huy, P.D. Hien, T.V. Luyen, D.V. Hoang, H.T. Hiep, N.H. Quang, N.Q. Long, D.D. Nhan, N.T. Binh, P.S. Hai, N.T. Ngo,

- Natural radio activity and external dose assessment of surface soils in Viet Nam, *Radiation Protection Dosimetry*, 1–10, (2012).
- [4]. S. Cebrián, C. Cuesta, J. Amaré, S. Borjabad, D. Fortuño, E. García, C. Ginestra, H. Gómez, M. Martínez, M.A. Oliván, Y. Ortigoza, A.O. Solórzano, C. Pobes, J. Puimedón, M.L. Sarsa, J.A. Villar, Background model for a NaI (Tl) detector devoted to dark matter searches, *Astropharticle Physics*, 37, 60–69 (2012).
- [5]. J. Verplancke, Low level gamma spectroscopy: low, lower, lowest, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A312*, 174–182 (1992).
- [6]. C. Bagatelas, C. Tsabaris, M. Kokkoris, C.T. Papadopoulos, R. Vlastou, Determination of marine gamma activity and study of the minimum detectable activity (MDA) in 4 π geometry based on Monte Carlo simulation, *Environmental Monitoring and Assessment*, 165, 159–168 (2010).
- [7]. Y. Nir – El, G. Haquin, Minimum detectable activity in situ γ – ray spectrometry, *Applied Radiation and Isotopes*, 55, 197–203 (2001).
- [8]. T.T. Thanh, C.V. Tạo, H.Đ. Tâm, V.T.H. Yên, Nghiên cứu ảnh hưởng của phòng đối với hệ phổ kế gamma, *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ ĐHQG – HCM*, 14, T-5, 16–17 (2011).
- [9]. L. Done, M – R. Ioan, Minimum detectable activity in gamma spectrometry and its use in low level activity measurements, *Applied Radiation and Isotopes*, 114, 28–32 (2016).
- [10]. L.A. Currie, Limits for qualitative detection and quantitative determination, *Analytical Chemistry Division*, 40, 586–593 (1968).
- [11]. M.C. Lépy, A. Pearce, O. Sima, Uncertainties in gamma-ray spectrometry, *Bureau International des Poids et Mesures*, 52, 123–145 (2015).
- [12]. Gilmore, *Practical Gamma-ray Spectrometry – 2nd Edition*, John Wiley & Son Ltd. (2008).
- [13]. http://www.canberra.com/products/radiochemistry_lab/pdf/Osprey-SS-C40303.pdf.