

Байгалийн цацраг идэвхийг судлах гамма спектрометрийн нэгэн арга

Н.Норов, С.Даваа, Н.Ганбаатар
(МУИС, Цөмийн судалгаааны төв)

1. Оршил

Цацрагийн экологи, цөмийн геохими, цацрагийн эрүүл ахуйн судалгаа хийхэд хүрээлэн байгаа орчин (хөрс, ус, агаар, уулын чулуулаг), эрдэс түүхий эд (нүүрс, ураны хүдэр, бордоо), барилгын материал, хүнсний бүтээгдэхүүний дээжинд байгалийн болон үүсмэл цацраг идэвхт изотопуудын хэмжээг нарийвчлал сайтай тодорхойлох гамма спектрометрийн арга зүй боловсруулах шаарлагатай байдаг.

Иймд бид төрөл бүрийн эзэлхүүнт дээжийг судлах гамма спектрометрийн үнэмлэхүй арга боловсруулсан бөгөөд энэ аргын мөн чанар нь дээж дэх байгалийн болон үүсмэл цацраг идэвхт изотопуудын хувийн идэвхийг тодорхойлохдоо сонгон авсан Маринеллийн саванд стандарт уусмал (ус) хэмжиж олсон детекторын бүртгэх чадвар (ϵ_0)-ын утганд судалж байгаа янз бүрийн нягттай дээжинд гамма квантын шингээлтийг тооцсон коэффициент(k)-оор засвар хийж тооцоход оршино. Хэрэв детекторын үнэмлэхүй бүртгэх чадвар $\epsilon_0(E_i)$ -г цацраг идэвхтэй усны хувьд тодорхойлчихвол химийн найрлага нь тодорхойгүй, дурын нягттай дээжийн хувьд бүртгэх чадвар $\epsilon(E_i) = k \cdot \epsilon_0(E_i)$ болно. Бидний хийсэн судалгаагаар Маринеллийн саванд цацраг идэвхтэй ус хийж туршлагаар олсон детекторын бүртгэх чадвар тооцоолж олсон утгатай сайн тохирч байгаа нь энэ үнэмлэхүй аргад ашиглаж байгаа илэрхийлэлүүд зөв болохыг баталж байгаа юм[1].

2. Дээж дэх цацраг идэвхт изотопуудын хувийн идэвхийг тодорхойлох

Гамма спектрометрээр i дүгээр изотопын хувийн идэвхийг дээж дэх цацраг идэвхт изотопуудын балансын тэгшитгэлээс дараах илэрхийлэлээр тооцно.

$$A_i = A_x \cdot \frac{\lambda_i^2 \cdot t_{\text{хэм}} \cdot t_{\text{аб}} \cdot \exp(\lambda \cdot t_{\text{хүл}})}{(1 - \exp[\lambda_i \cdot t_{\text{хэм}}])(1 - \exp[\lambda_i \cdot t_{\text{аб}}])} \cdot (1).$$

Үүнд: $A_x = [S(E_i) / t_{xэм}] / [\varepsilon(E_i) \cdot n_i \cdot m]$

$S(E_i)$ - E_i энергитэй гамма квантын бүрэн шингээлтийн шугамын талбай (имп); $t_{xэм}$ - хэмжих хугацаа (с);

$\varepsilon(E_i) = k \cdot \varepsilon_0(E_i)$ - детекторын үнэмлэхүй бүртгэх чадвар;

$\varepsilon_0(E_i)$ - Маринеллийн саванд цацраг идэвхтэй ус хэмжиж олсон детекторын бүртгэх чадвар;

k - детектор, дээжийн геометр хэмжээ, тэдгээрийн харилцан байрлал, судалж байгаа дээжинд болон усанд γ -квантын сулралт зэргээс хамаарах коэффициент; n_i - гамма квантын гаралт;

m - дээжний жин (кг); λ_i - i дүгээр изотопын задралын тогтмол;

$t_{хүл}$ - дээж авснаас хэмжих хүртэл хүлээх хугацаа (с);

t_{ab} - дээж авхад зарцуулагдах хугацаа (с); A_i нь Бк/кг нэгжээр гарна.

Цацраг идэвхт изотопын хагас задралын үе урт бол ($T_{1/2} \gg t_{ab}$, $T_{1/2} \gg t_{хүл}$, $T_{1/2} \gg t_{xэм}$) бол (1) илэрхийллээс дээж дэх i дүгээр изотопын хувийн идэвхийг доорх байдлаар олж болно.

$$A_x = \frac{S(E_i)}{n_i \cdot k \cdot \varepsilon_0(E_i) \cdot t_{xэм} \cdot m} \quad (2)$$

Судалж байгаа дээжинд гамма квантын урсгалын сулралын коэффициентийг стандарт изотопон үүсгүүр (^{152}Eu)-ээр тодорхойлоход дараах илэрхийллийг ашиглана [1].

$$\mu(E_i) = [\ln(S_x(E_i) / S_d(E_i))] / d$$

Үүнд: $S_x(E_i)$ - сав хоосон байхад хэмжсэн E_i - энергитэй γ -квантын бүрэн шингээлтийн шугамын талбай;

$S_d(E_i)$ - саванд дээж хэмжих үед E_i - энергитэй γ -квантын бүрэн шингээлтийн шугамын талбай;

d - хэмжих саван дахь дээжийн зузаан (см).

Коэффициент k -г дараах илэрхийллээр тооцоно [1].

$$k = \frac{\mu_o(E_i)}{\mu(E_i)} \cdot \frac{1 - \exp[-\mu(E_i) \cdot d]}{1 - \exp[-\mu_o(E_i) \cdot d]}, \quad (3)$$

Үүнд: $\mu_o(E_i)$ - усанд гамма квантын урсгалын сулралын шугаман коэффициент (см^{-1});

$\mu(E_i)$ - судлах дээжинд гамма квантын урсгалын сулралын шугаман коэффициент (см^{-1});

d - дээжний зузаан (см).

Хэрэв i -р цацраг идэвхт изотопын хувийн идэвх (A_x)-ийг гамма спектрометрээр хэмжсэн спектрийн N тооны шугамаар

$$A_x = \left(\sum_{j=1}^N (S_j / t_{\text{хэм}}) \right) / \sum_{j=1}^N \varepsilon(E_j) \cdot n_j \cdot m,$$

тодорхойлох бол гамма квантын шугам тус бүрийн эрчимтэй шууд хамааралтай жингээр A_x хэмжигдэхүүнийг дундачлах нь зүйтэй.

Изотопын хувийн идэвх(A_x)-ийг тодорхойлоход гарах алдаа нь $\varepsilon(E_j)$, n_j , m - хэмжигдэхүүнүүдийг туршлагаар тодорхойлох систематик алдаа болон гамма квантын бүрэн шингээлтийн шугамын талбай (S_j)-г тодорхойлох алдаагаар тооцогдоно.

$$S = \sum_{k=1}^P S_k - \frac{P}{2m} \left(\sum_{i=1}^m B_i + \sum_{j=1}^m B_j \right); \quad (4).$$

Үүнд: ΔS_j – j -р гамма квантын бүрэн шингээлтийн шугамын талбайн статистик алдаа.

Хэмжилтийн дүнг боловсруулахад γ -квантын бүрэн шингээлтийн шугамын талбайг доорх илэрхийллээр тодорхойлно.

$$\Delta A_x = \left(\sum_{j=1}^N (\Delta S_j / t_{\text{хэм}}) \right) / \sum_{j=1}^N \varepsilon(E_j) \cdot n_j \cdot m,$$

Үүнд: S – бүрэн шингээлтийн шугамын цэвэр талбай;

S_k – нийт талбай;

B_i – бүрэн шингээлтийн шугамын зүүн хэсгийн i -р суваг дахь импульсын тоо;

B_j – бүрэн шингээлтийн шугамын баруун хэсгийн j -р суваг дахь импульсын тоо

P – бүрэн шингээлтийн шугамын сувагийн тоо

m – бүрэн шингээлтийн шугамын зүүн, баруун талд авсан сувгийн тоо.

Бүрэн шингээлтийн шугамын талбайн алдаа

$$\sigma_N^2 = S + \left[\left(\frac{P}{2m} \right)^2 + \frac{P}{2m} \right] \cdot \left(\sum_{i=1}^m B_i + \sum_{j=1}^m B_j \right) \quad \text{болно.}$$

Гамма спектрт ажиглагдах шугамын талбайн хамгийн бага утга нь болно.

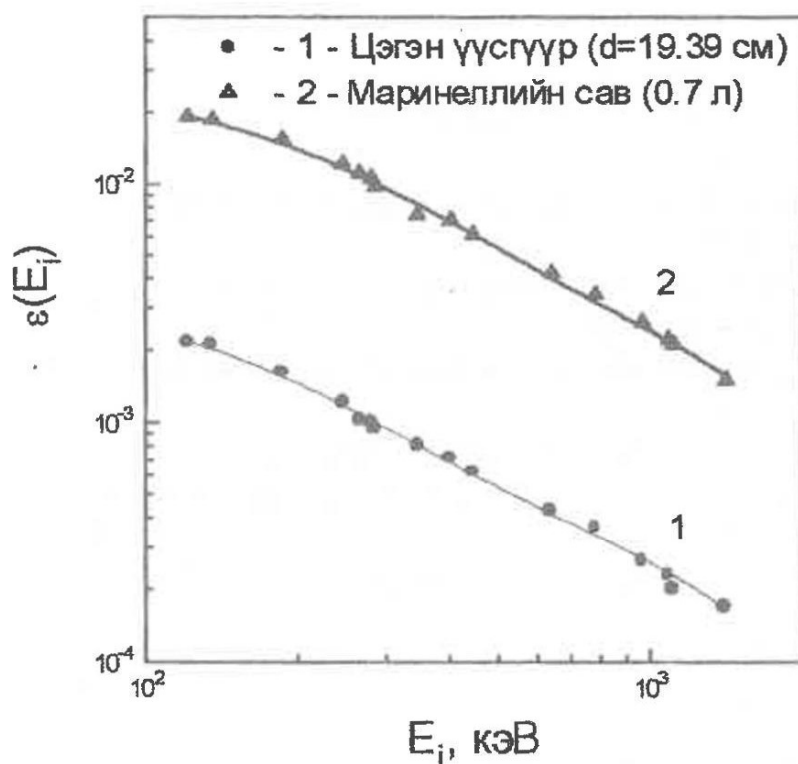
$$S_{\min} = u \cdot \left[\frac{p}{2m} \left(\frac{p}{2m} + 1 \right) \left(\sum_{i=1}^m B_i + \sum_{j=1}^m B_j \right) \right]^{1/2}, \quad (5).$$

Үүнд: u - үнэмшлийн магадлалаар тодорхойлогдох коэффициент.

Илрүүлэх хувийн идэвхийн доод хэмжээ нь:

$$A_{\min} = \frac{S_{\min}}{n_i \cdot k \cdot \varepsilon_o(E_i) \cdot t_{\text{хэм}} \cdot m};$$

байна. 0,7л эзэлхүүнтэй Маринеллийн саванд цацраг идэвхт ус хэмжиж олсон гамма спектрометрийн үнэмлэхүй бүртгэх чадварыг 1-р зурагт үзүүлэв.



Зураг 1. Гамма спектрометрийн үнэмлэхүй бүртгэх чадвар

1-р хүснэгтэд уран, тори, актинийн байгалийн цацраг идэвхт задралын бүлд үүсэх гамма цацраг идэвхт изотопуудын хагас задралын үе, гамма квантын энерги ба эрчмийг үзүүлэв.

Хүснэгт 1. Байгалийн γ -цацраг идэвхт изотопууд

Анхдагч цөм	Цацраг идэвхт изотоп	Хагас задралын үе [4]	Энерги(кэВ) [2,4]	Үнэмлэхүй эрчим (%) [2,3,4]
^{238}U 4.468(5)·10 ⁹ жил	^{234}Th	24.1 өдөр	63.288(18)	3.8(3)
	^{234}Th	24.1 өдөр	92.35(3)	2.73(20)
	^{234}Th	24.1 өдөр	92.78(3)	2.69(20)
	^{234}Pa	1.17 мин	1001.03(3)	0.590(14)
	^{226}Ra	1602 жил	186.10(10)	3.50(5)
	^{214}Pb	26.8 мин	241.981(8)	7.50(10)
	^{214}Pb	26.8 мин	295.213(8)	18.5(3)
	^{214}Pb	26.8 мин	351.921(8)	35.8(5)
	^{214}Bi	19.9 мин	609.312(7)	44.8(5)
	^{214}Bi	19.9 мин	1120.287(10)	14.8(2)
	^{214}Bi	19.9 мин	1238.110(12)	5.78(7)
	^{214}Bi	19.9 мин	1764.494(14)	15.36(20)
^{235}U 7.037(7)·10 ⁸ жил	^{231}Th	1 өдөр	84.214(3)	6.71(10)
	^{235}U	7.037(7)·10 ⁸ жил	143.76(2)	10.96(8)
	^{235}U	7.037(7)·10 ⁸ жил	163.33(2)	5.08(4)
	^{235}U	7.037(7)·10 ⁸ жил	185.715(5)	57.2(5)
	^{235}U	7.037(7)·10 ⁸ жил	205.311(10)	5.01(5)
^{232}Th 1.405(6)·10 ¹⁰	^{228}Ac	6.13 цаг	209.32(7)	3.81(11)
	^{228}Ac	6.13 цаг	270.26(8)	3.44(9)
	^{228}Ac	6.13 цаг	328.07(9)	3.10(9)
	^{228}Ac	6.13 цаг	338.42(6)	11.26(27)
	^{228}Ac	6.13 цаг	463.10(7)	4.50(12)
	^{228}Ac	6.13 цаг	794.79(11)	4.34(11)
	^{228}Ac	6.13 цаг	911.16(3)	26.6(7)
	^{228}Ac	6.13 цаг	964.64(8)	5.05(14)
	^{228}Ac	6.13 цаг	968.97(5)	16.23(38)
	^{228}Ac	6.13 цаг	1588.23(12)	3.26(10)
^{228}Th 1.913(2) жил	^{212}Pb	10.64 цаг	238.632(2)	43.5(4)
	^{224}Ra	3.64 өдөр	241.0(1)	4.05(4)
	^{212}Pb	10.64 цаг	300.087(10)	3.25(4)
	^{208}Tl	3.053 цаг	510.80(8)	8.19(11)
	^{208}Tl	3.053 цаг	583.191(2)	30.58(22)
	^{212}Bi	60.55 мин	727.330(9)	6.64(9)
	^{208}Tl	3.053 цаг	860.564(5)	4.50(4)
	^{208}Tl	3.053 цаг	2614.533(13)	35.88(6)

3. Уран-радийн цацраг идэвхийн тэнцвэр

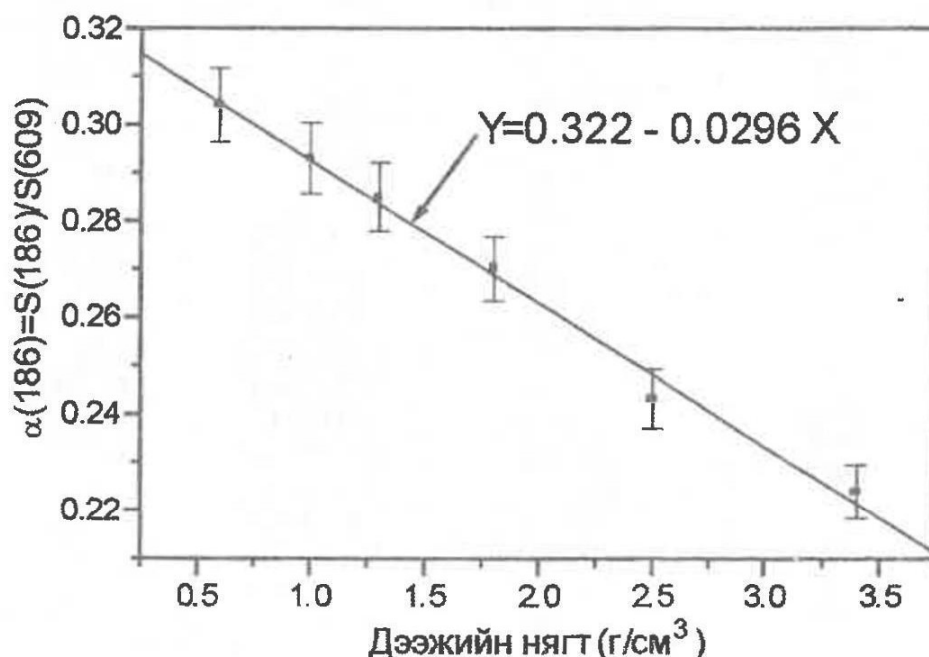
^{235}U -ын задралын харьцангуй сул эрчимтэй 163.3 кэВ энергитэй γ -шугамыг ураны агуулгыг [6] тодорхойлоход, 143.8 кэВ энергитэй γ -шугамын эрчмээр ради, ураны харьцааг [7] тодорхойлоход ашиглах харьцангуй аргуудыг боловсруулжээ. Эдгээр гамма шугамуудын эрчим нь 185.7 кэВ энергитэй шугамын эрчмээс харгалзан 11 ба 5.7 дахин бага юм. Иймээс уран, радийн цацраг идэвхийн тэнцвэрийг 186 кэВ энергитэй нийлбэр шугамын эрчмээр шалгах үнэмлэхүй арга боловсруулав.

Уран агуулсан уулын чулуулгын стандарт дээж СГ-1А-г саванд хийж битүүмжлээд, ради-радоны цацраг идэвхийн тэнцвэр тогтоон ^{226}Ra , ^{222}Rn -ын задралын бүтээгдэхүүнүүдийн гамма шугамуудын талбайг 609 кэВ энергитэй шугамын талбайд харьцуулсан дүнг 2-р хүснэгтэд үзүүлэв

Хүснэгт 2.

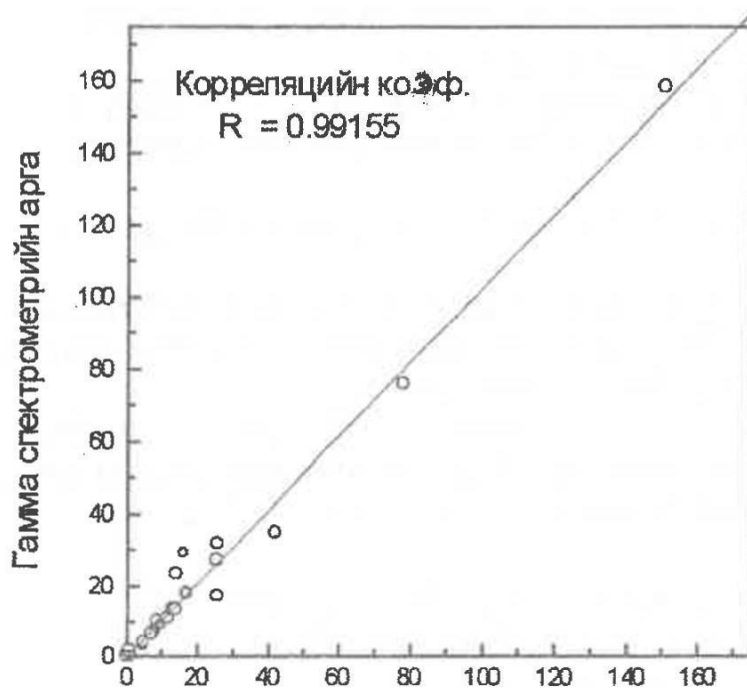
Үзүүлэлт	^{226}Ra	^{214}Pb		^{214}Bi			
Е, кэВ	186	295	352	609	768	1120	1764
α_{Ra}	0.285	0.896	1.493	1	0.091	0.179	0.124

Дээжийн нягтаас хамааран γ -квантууд түүнд өөр өөрөөр шингээгдэж, тэдгээрийн 2-р хүснэгтэд үзүүлсэн гамма шугамуудын талбайн харьцаа өөрчлөгдөнө.



Зураг 2. ^{226}Ra -ийн 186 кэВ, ^{214}Bi -ийн 609 кэВ шугамын эрчмийн харьцаа $[\alpha(186)]$ ба дээжний нягтын хамаарал

Энэ нөлөөг тооцохын тулд янз бүрийн нягттай дээж бүрийн хувьд γ -квантуудын шугамын талбайн харьцаа $\alpha(E_i)=S(E_i)/S(609)$ -г 2-р зурагт үзүүлсэн харгалзах үзүүлэлт $\alpha_{Ra}(E_i)$ -тай харьцуулсан $\beta(E_i)=\alpha(E_i)/\alpha_{Ra}(E_i)$ харьцааг тогтоож, 186 кэВ энергитэй шугамын хувьд экстрополяц хийж, $\alpha(186)$ нь дээжний нягтаас $\alpha(186)=0.322-0.0296\rho$ хамааралтай болохыг тогтоов (зураг.2.). Үүнд: ρ -дээжийн нягт (г/см^3). ^{235}U -ын 185.7 кэВ энергитэй шугамаар ураны агуулгыг тодорхойлоход энэ шугам нь ^{226}Ra -ын 186.2 кэВ энергитэй шугамтай давхацдаг учир тухайн дээжин дэх ураны агуулгыг тодорхойлохын тулд 186 кэВ энергитэй нийлбэр шугамын талбайд ^{226}Ra -ийн эзлэх хувийг зөв тооцох шаардлага гарна. Уран, радийн хооронд цацраг идэвхийн тэнцвэр тогтсон үед ^{226}Ra -ийн эзлэх хувь 56,6% байдаг [5]. Бидний боловсруулсан энэ аргаар уран, радийн хооронд цацраг идэвхийн тэнцвэр тогтсон үед ^{226}Ra -ийн 186,2 кэВ энергитэй гамма квантын бүрэн шингээлтийн шугамын талбайг 609,3 кэВ энергитэй шугамын талбайгаар тодорхойлж, түүнийг 186 кэВ-ийн нийлбэр талбайгаас хасаж ^{235}U -ын 187,5 кэВ энергитэй γ -квантын бүрэн шингээлтийн шугамын талбайг олно.



Зураг 3. Багануурын нүүрсний уурхайн мөрөгцөгийн дээж дэх ураны агуулгыг (г/т) тодорхойлсон аргын үнэмшил.

$$S_{Ra}(186,2) = \alpha_{Ra}(186) \cdot S(609)$$

$$S_U(185,7) = S(186,2) - \alpha_{Ra}(186) \cdot S(609) .$$

Үүнд: $\alpha_{Ra}(186)$ -ийн утгыг хэмжиж байгаа дээжний нягтаас хамааруулан 2-р зургаас авна.

Энэ аргаар Багануурын нүүрсэн дэх ураны агуулгыг тодорхойлсон дүн ^{235}U -ын хуваагдлын хэлтэрхийн мөрийг трек детектороор бүртгэж тодорхойлсон дүнтэй сайн тохирч байгааг 3-р зурагт үзүүлэв.

Ашигласан хэвлэл

1. Норов.Н, С.Даваа, Н.Ганбаатар, Г.Хүүхэнхүү, Б.Болормаа, 1998, Эзэлхүүнт дээжийг судлах гамма спектрометрийн үнэмлэхүй арга, МИУС, Эрдэм шинжилгээний бичиг №4(137), УБ, 62-67-р тал.
2. Debertin, K., R.G.Helmer, 1988, Gamma and X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors, North Holland Publishers, Amsterdam.
3. Ellis-Akovoli Y.A., 1987, Nucl. Data Sh. 50(1)
4. Firestone, R.B., V.S.Shirley, 1996, Table of Isotopes, Eighth edition, John Willey and Sons, New York.
5. Chultem.D, N.Norov, J.Ganzorig, N.Gansukh, 1991, A study of uranium/Radium disequilibrium by the spectral line centroid expansion method, Nuclear Geophysics, vol.5, №4, pp541-545, Oxford, Pergamon Press.
6. Bickel.M, W.Nagel, and F.Qulk, 1996, High precision determination of Uranium in ore by Gamma-ray Spectrometry, J.Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.209, №1, pp.113-121.
7. Сэрээтэр.Ж, Н.Ганбаатар, Ш.Гэрбиш, 1996, Ураны хүдрийн дээжинд радий, ураны харьцааг тодорхойлох харьцангуй арга, МУИС, Эрдэм шинжилгээний бичиг №2(125), 73-76-р тал.

A γ -Ray Spectrometry Method for Study of Natural Radioactivity

Abstract. The γ -ray spectrometry simple and absolute method has been found out to determine the concentration of natural radionuclides in environment (soil, water, air, rock), minerals (coal, uranium ore, phosphorus), building materials and some food samples. This method is based on the measurement of γ -ray intensive energy 186 keV from ^{235}U and ^{226}Ra decays for studying a Ra/U disequilibrium.