

Улаанбаатар хотын хөрсний гамма цацрагийн эрсдэлийн үнэлгээ

Б.Эрдэв^{а*}, С.Батмөнх^а, З.Баттогтох^а

^аШинжлэх ухаан, технологийн их сургууль, Дулааны техник, үйлдвэрлэлийн экологийн хүрээлэн, Улаанбаатар, Монгол улс

Энэхүү судалгаагаар Улаанбаатар хотын хүн ам шигүү суурьшсан бүсэд хөрсний гамма цацрагийн нөлөөллөөс үүдэх амьдралын туршид илүүдэл хорт хавдраар өвчлөх эрсдэл (Excess Lifetime Cancer Risk, ELCR)-ийг үнэлэв. Судалгаанд нэг километрийн зайтайгаар тэгш өнцөгт тор үүсгэн сонгосон цэгүүдээс 2025 онд цуглуулсан хөрсний дээжийг МУИС-ийн Цөмийн шинжлэх ухаан, технологийн үндэсний хүрээлэнгийн магадлан итгэмжлэгдсэн гаммаспектрометрийн лабораторид хэмжив. Хэмжилтийн үр дүнг үндэслэн жилийн эффектив тун (Annual Effective Dose, E_{out}) болон ELCR-ийг тооцоолж, үр дүнгийн тархалт болон хэмжилтийн эргэлзээг Монте Карлогийн симуляцийн аргаар үнэлэв. ELCR-ийг хүн амын эрсдлийн коэффициентээр үнэлэхэд 2025 онд дунджаар 0.261×10^{-3} байгааг тогтоов. Энэхүү дундаж утга нь олон улсын хүлцэх хамгийн их утга (0.290×10^{-3})-аас бага байв. Нас, хүйсээс хамаарсан эрсдэлийн коэффициентээр үнэлэхэд хүүхдийн ELCR хамгийн өндөр, дараа нь эмэгтэйчүүдийн ELCR өндөр гарсан. Хүүхдийн ELCR бүх хэмжилтийн цэгт, харин эмэгтэйчүүдийн ELCR ихэнх хэмжилтийн цэгт олон улсын хүлцэх хамгийн их утгаас давсан байна. Иймээс эдгээр бүлэг болон өндөр ELCR илэрсэн байршлуудад чиглэсэн нарийвчилсан мониторинг, эрсдэлийн үнэлгээг цаашид үргэлжлүүлэх шаардлагатай. Энэхүү судалгаа нь Улаанбаатар хотын хөрсний цацрагийн мэдээллийг баяжуулж, урт хугацааны мониторинг болон эрсдэлийн үнэлгээний суурь мэдээлэл болох ач холбогдолтой.

Түлхүүр үгс: хөрсний гамма цацраг, гадна агаарт шингэсэн тунгийн чадал, жилийн эффектив тун-гадна, амьдралын туршид илүүдэл хорт хавдраар өвчлөх эрсдэл (ELCR)

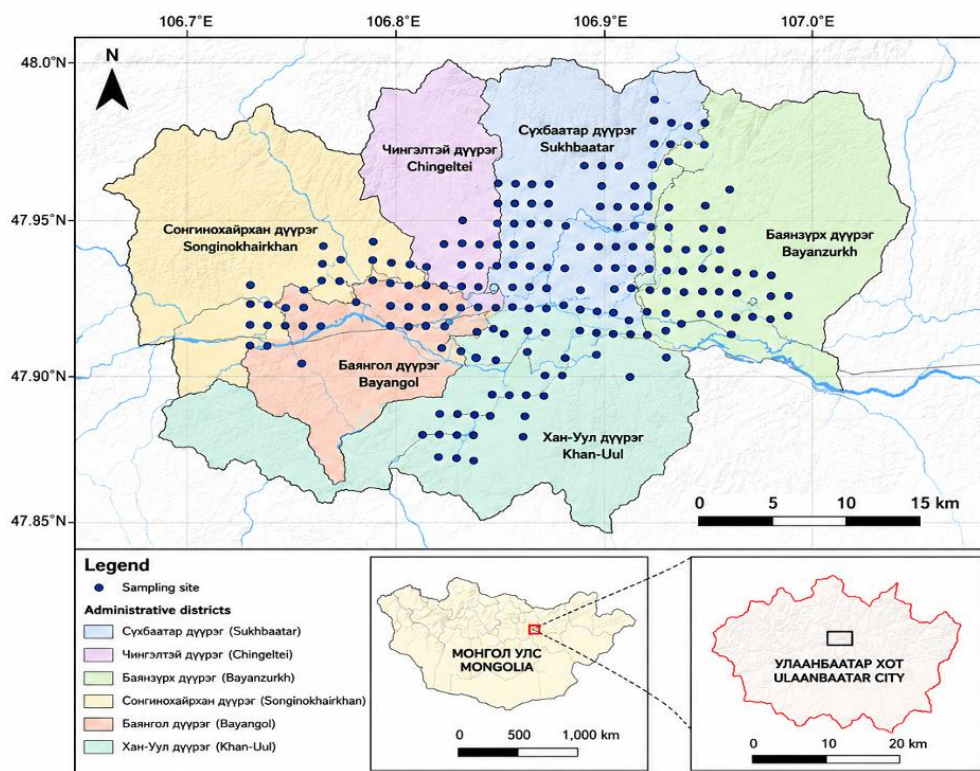
I.УДИРТГАЛ

Хүн амын иончлогч цацрагт өртөх байдал нь эрүүл мэндэд урт хугацааны сөрөг нөлөө үзүүлэх хүчин зүйлсийн нэг бөгөөд ялангуяа хорт хавдраар өвчлөх эрсдэлтэй шууд хамааралтай тооцогддог. Байгалийн гаралтай болон хүний үйл ажиллагаанаас үүдэлтэй цацрагийн эх үүсвэрүүд нь хүн амыг тасралтгүй бага тунгийн иончлогч цацрагт өртүүлж болзошгүй байдаг. Ийм өртөлт нь шууд илрэх нөлөөллөөс гадна амьдралын туршид хуримтлагдан илрэх стохастик нөлөөлөл, ялангуяа хорт хавдраар өвчлөх эрсдэлийг нэмэгдүүлдэг.

Цацрагийн эрүүл мэндийн эрсдэлийг үнэлэхэд амьдралын туршид илүүдэл хорт хавдраар өвчлөх эрсдэл (ELCR) нь өргөн хэрэглэгддэг үзүүлэлт бөгөөд тухайн хүн ам иончлогч цацрагийн нөлөөлөлд өртсөний улмаас амьдралын туршид хорт хавдраар өвчлөх эрсдэл хэр хэмжээгээр нэмэгдэхийг илэрхийлдэг. ELCR-ийг ихэвчлэн жилийн эффектив тун (E_{out})

болон хорт хавдрын эрсдэлийн коэффициентэд тулгуурлан тооцдог бөгөөд энэ нь орчны цацрагийн аюулгүй байдлыг үнэлэх, эрсдэлийн харьцуулалт хийхэд чухал ач холбогдолтой [1,3]. Сүүлийн жилүүдэд байгалийн цацрагийн түвшин харьцангуй өндөр бүс нутаг, барилгын материал, хөрс, ус, агаар дахь цацраг идэвхт цөмүүдийн агууламжтай холбоотой судалгаанууд эрчимтэй хийгдэж, тэдгээрийн хүн амын эрүүл мэндэд үзүүлэх нөлөөллийг ELCR-ээр тодорхойлох аргаар үнэлэх хандлага нэмэгдэж байна [1,3,6-9]. Гэсэн хэдий ч тухайн бүс нутгийн бодит хэмжилтэд суурилсан эрсдэлийн үнэлгээ нь хангалтгүй хэвээр байна. Иймд энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь хөрсний цацрагийн гаммаспектрометрийн хэмжилтийн өгөгдөлд үндэслэн хүн амын жилийн эффектив тунг тодорхойлж, түүнээс хамаарах ELCR-ийг үнэлэхэд оршино. Судалгааны үр дүн нь орчны цацрагийн аюулгүй байдлын үнэлгээ, эрүүл мэндийн эрсдэлийн шинжилгээ, цаашдын хяналт судалгааны

* Э-шуудан: erdevb@gmail.com



Зураг 1. Улаанбаатар хотын хөрсний цацрагийн судалгааны цэгүүдийн байршил.

үндэслэл боловсруулахад бодитой хувь нэмэр оруулах ач холбогдолтой юм.

II. АРГАЗҮЙ, ҮР ДҮН

А. Байгалийн цацраг идэвх

Улаанбаатар хотын сонгосон хэмжилтийн цэгүүдээс цуглуулсан хөрсний дээжид агуулагдах байгалийн цацраг идэвхт изотопуудын идэвхжилийг цэвэр германи (HPGe) детектор бүхий гаммаспектрометрийн аргаар тодорхойлсон [2,4,6]. 2025 онд хэмжилт хийсэн 180 цэгийн байршлыг Зураг 1-ээр үзүүлээ. Судалгаанд ^{226}Ra , ^{232}Th болон ^{40}K изотопуудыг шинжилсэн бөгөөд эдгээр нь хөрснөөс үүсэх гамма цацрагийн үндсэн эх үүсвэрүүд юм [1]. Судлагдсан байршлуудын 2025 онд хэмжсэн хөрсний изотопуудын хувийн

идэвхжил болон бусад үзүүлэлтүүдийг цацрагийн дэлхийн жишиг түвшин [1,3,4]-тэй харьцуулан, хүснэгт 1-д үзүүлэв. Хүснэгт 1-ээс харахад хөрсний байгалийн ^{226}Ra , ^{232}Th болон ^{40}K изотопуудын хувийн идэвхжил харьцангуй тогтвортой байна [6]. ^{226}Ra -ийн дундаж идэвхжил 2025 онд (28.3 ± 11.3) Бк/кг ба (16-93) Бк/кг хооронд, ^{232}Th -ийн дундаж идэвхжил (19.0 ± 3.6) Бк/кг (12-37) Бк/кг-ийн хооронд, ^{40}K -ийн дундаж идэвхжил (682.5 ± 93.7) Бк/кг ба (437-1056) Бк/кг хооронд тус тус хэлбэлзэлтэй байсан. ^{40}K -ийн хувьд дэлхийн үзүүлэлтүүдээс нилээд өндөр байгааг хүснэгт 1-ээс харж болно. Энэ нь тухайн байршлын хөрсний тогтоцтой холбоотой бөгөөд цацрагийн эрсдэлийн үнэлгээнд бага нөлөөтэй (D_{out} -д оруулах коэффициент (0.0417 нГр/ц·Бк $^{-1}$ ·кг) нь ^{226}Ra болон ^{232}Th -ын харгалзах коэффициентүүдээс үлэмж бага байдаг).

Үзүүлэлт	Дундаж утга		Хэлбэлзлийн хүрээ		Медиан
	Монголд -2025	Дэлхийд	Монголд -2025	Дэлхийд	
^{226}Ra , Бк/кг	28.3 ± 11.3	35	16-93	10-200	26
^{232}Th , Бк/кг	19.0 ± 3.6	30	12-37	7-50	19
^{40}K , Бк/кг	682.5 ± 93.7	400	437-1056	100-700	675
D_{out} , нГр/ц	52.974 ± 7.090	59	41.5-84.9	18-93	52
E_{out} , мЗв/жил	0.075 ± 0.010	0.07	0.061-0.142	0.02-0.11	0.074
ELCR ($\times 10^{-3}$)	0.261 ± 0.035	0.290	0.202-0.421	0.08-0.40	0.257

Хүснэгт 1. Улаанбаатар хотын хөрсний цацрагийн үзүүлэлтүүдийг дэлхийн үзүүлэлтүүдтэй харьцуулан үзүүлсэн нь

Судалгаагаар тодорхойлсон дээрх цацрагийн үзүүлэлтүүдийн дундаж утгууд нь Нэгдсэн Үндэстний Байгууллагын Цөмийн цацрагийн нөлөөллийг судлах шинжлэх ухааны хороо (UNSCEAR)-ны мэдээлсэн дэлхийн дундаж түвшинтэй жишихүйц байсан [1].

В. Агаарт шингэсэн гамма цацрагийн тунгийн чадал

Хөрсөн дэх цацраг идэвхт цөмүүдийн хувийн идэвхжилд үндэслэн агаарт шингэсэн гамма тунгийн чадлыг UNSCEAR-ны стандарт хөрвүүлэх коэффициентийг ашиглан тооцоолов [1]. Үүнд, гадна агаарт шингэсэн тунг дараах илэрхийллээр тодорхойлсон:

$$D_{out} = 0.462A_{Ra} + 0.604A_{Th} + 0.0417A_K \quad (1)$$

Энд D_{out} -гадна агаарт шингэсэн тун, нГр/ц, A_{Ra} , A_{Th} , ба A_K (Бк/кг)- ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K изотопуудад харгалзах хувийн идэвхжил.

Хүснэгт 1-ээс Шингэсэн тунгийн дундаж чадал (52.974 ± 7.090) нГр/ц ба ($41.5-84.9$) нГр/ц хооронд тодорхойлогдсон. Энэ нь олон улсын дундаж байгалийн фон цацрагийн түвшинд байна [1].

Тооцоолон гаргасан шингэсэн тунгийн чадлууд нь судалгааны бүсийн хэмжээнд орон зайн хувьд ялгаатай тархалттай байгааг харж болно [6]. Энэ нь тухайн бүсийн геологийн тогтоц болон хөрсний эрдсийн найрлагын ялгаатай байдалтай холбоотой байж болно.

С. Жилийн эффектив тун ба амьдралын туршид илүүдэл хорт хавдраар өвчлөх эрсдэл (ELCR)

Хөрсний гамма цацрагийн хүний эрүүл мэндэд үзүүлэх нөлөөллийг үнэлэх зорилгоор жилийн эффектив тун-гадна (E_{out}) болон ELCR-ийг тооцоолсон. Цацрагийн хамгааллын үнэлгээнд Монгол Улсын Цацрагийн аюулгүйн нормыг ашиглав [5].

Гадна агаарт шингэсэн тунгийн чадал (D_{out})-ыг нГр/ц нэгжээр тодорхойлсон бөгөөд цацрагийн биологийн нөлөөллийг үнэлэх зорилгоор тунгийн хөрвүүлэх коэффициент (0.7 Зв/Гр) ашиглан мкЗв/ц-д шилжүүлсэн. Гамма цацрагийн хувьд цацрагийн жинлэх коэффициент $W_R = 1$ байдгийг тооцвол шингэсэн тунгийн чадал нь эквивалент тунгийн чадалтай тэнцүү байна ($H_{equ} = D$). Үүний үндсэн дээр жилийн эффектив тун-гадна (E_{out})-г тооцоолсон [1,3].

$$E_{out} = 1.4 \times 10^{-3} \times D_{out} \quad (2)$$

Энд E_{out} - жилийн эффектив тун-гадна, мЗв/жил, D_{out} - гадна агаарт шингэсэн тунгийн чадал, нГр/ц.

Томьёо (2)-т тухайн орчинд байх хугацааны коэффициентийг 0.23, (Гадна орчинд байх хугацааны коэффициентийг Улаанбаатар хотын оршин суугчдын тухайн бүсэд хамаарах зан үйлийн хэв маягт үндэслэн, дээжийг дулааны улирлуудад хураан авсан ба бусад нөхцлүүдийг тооцож 0.23 гэж тогтоосон). тунгийн хөрвүүлэх коэффициентийг 0.7 Зв/Гр, жилд ногдох нийт цагийг 8760-аар тооцсон болно [1].

Дээрх аргаар тооцоолсон жилийн дундаж эффектив тунг Хүснэгт 1-д харуулсан. Үүнээс харахад жилийн эффектив тунгийн чадал дунджаар (0.075 ± 0.010) мЗв/жил, ($0.061-0.142$) мЗв/жил хооронд хэлбэлзэж байгаа нь хүн амын хувьд цацрагийн эрсдэл тийм ч өндөр түвшинд биш байгааг илэрхийлж байна [3,5].

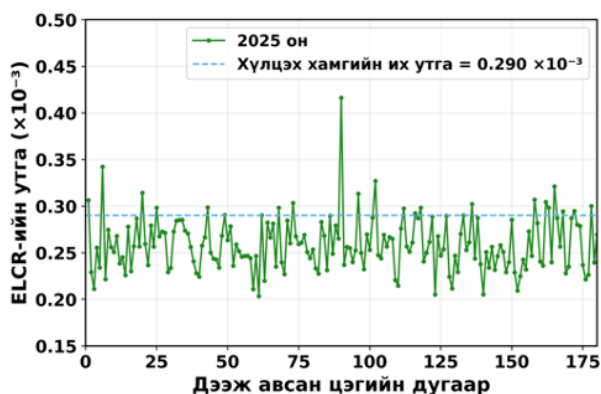
ELCR-ийг жилийн эффектив тун-гадна (E_{out}), дундаж наслалт (DL) болон Цацрагийн хамгааллын олон улсын комисс (ICRP)-оос гаргасан хорт хавдрын эрсдэлийн коэффициент (RF)-д үндэслэн тодорхойлов [3].

$$ELCR = E_{out} \times DL \times RF \quad (3)$$

Энд ELCR- амьдралын туршид илүүдэл хорт хавдраар өвчлөх эрсдэл, E_{out} - жилийн эффектив тун-гадна, мЗв/жил, DL - дундаж наслалт (70 жил), RF - цацрагаас шалтгаалах хорт хавдрын эрсдэлийн коэффициент, Зв^{-1} юм. Эрсдлийн коэффициент (RF , Зв^{-1}) нь хүн амд дунджаар 0.05, насанд хүрсэн эрэгтэй 0.04, насанд хүрсэн эмэгтэй 0.06, хүүхэд (0-10 нас) 0.09, ахмад (60 наснаас дээш) 0.025 байдгийг харгалзан үзсэн болно [3].

Хүн амын эрсдлийн коэффициентээр тооцоход 2025 онд ELCR-ийн дундаж утга 0.261×10^{-3} ба цэгүүдийн утга ($0.202-0.421$) $\times 10^{-3}$ хооронд хэлбэлзэлтэй байгааг Хүснэгт 1, болон Зураг 2-т хүн амын хувьд эрсдэлийн коэффициентийг 0.053 Зв^{-1} -аар авсан тохиолдлын үед тооцоолсон ELCR утгыг олон улсын хүлцэх хамгийн их утгатай харьцуулан харууллаа. Үүнээс харахад тооцоолсон ELCR-ийн утгууд нь хэмжилтийн цэгүүдэд ялгаатай байна. Ихэнх цэгүүдийн ELCR утга нь олон улсын хүлцэх хамгийн их утга болох 0.29×10^{-3} -аас бага байгаа боловч зарим цэгүүд уг босготой ойролцоо цөөхөн цэг бүр өндөр утгатай байна. Энэ нь тодорхой байршлуудад харьцангуй өндөр цацрагийн эрсдэл байж болохыг харуулж байна. Иймээс

тухайн байршлуудад хяналт явуулах шаардлагатай.



Зураг 2. ELCR-ийн утгыг олон улсын хүлцэх хамгийн их утгатай харьцуулан үзүүлсэн нь (эрсдэлийн коэффициентийг хүн амын 0.053г^{-1} -аар авсан тохиолдолд)

Энэ судалгаанд тооцсон ELCR-ийн дундаж утга (0.261×10^{-3}) нь дэлхийн хүлцэх хамгийн их утга болох 0.29×10^{-3} -аас бага, мөн энэ үзүүлэлт нь Туркийн Киркларели бүсэд мэдээлэгдсэн 0.50×10^{-3} утгаас бага [7], харин Косовогийн 0.17×10^{-3} утгаас [8] харьцангуй өндөр байна. Харин Улаанбаатар хотын Нарангийн энгэрийн төвлөрсөн хог хаягдлын цэгт мэдээлэгдсэн $(0.8-1.38) \times 10^{-3}$ хэмжээний ELCR-тай харьцуулахад энэхүү судалгааны үр дүн бага байгаа нь харагдаж байна [9]. ELCR-ийн нас, хүйсээс хамаарсан эрсдэлийн коэффициентээр тооцсон ELCR-ийн статистик үзүүлэлтүүдийг Хүснэгт 2-оор, харьцуулсан үр дүнг Зураг 3-аар үзүүлэв.

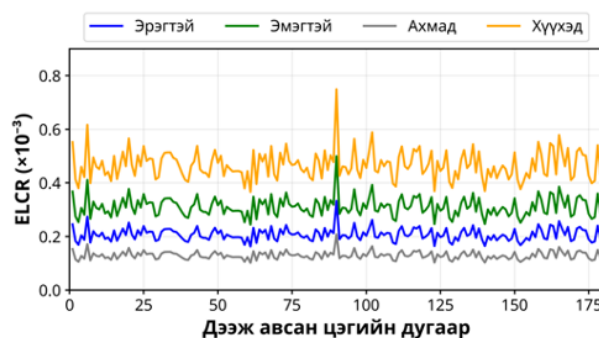
Үзүүлэлтүүд	2025			
	Эрэгтэй	Эмэгтэй	Ахмад	Хүүхэд
Дээжийн тоо	180	180	180	180
Дундаж ($\times 10^{-3}$)	0.208	0.313	0.130	0.469
Медиан ($\times 10^{-3}$)	0.205	0.308	0.128	0.462
SD ($\times 10^{-3}$)	0.027	0.040	0.017	0.060
Min ($\times 10^{-3}$)	0.163	0.244	0.102	0.366
Max ($\times 10^{-3}$)	0.380	0.570	0.238	0.855

Хүснэгт 2. ELCR-ийн нас, хүйсээс хамаарсан статистик үзүүлэлтүүд

Судалгаанд эрэгтэй, эмэгтэй, ахмад болон хүүхдийн бүлэг тус бүрт 180 хэмжилтийн цэгийн өгөгдлийг ашигласан. Үр дүнгээс харахад дундаж ELCR эмэгтэйчүүдэд 0.313×10^{-3} байгаа нь эрэгтэйчүүдийн 0.208×10^{-3} -аас өндөр байна. Мөн хүүхдийн бүлэгт дундаж ELCR нь 0.469×10^{-3} хамгийн өндөр, ахмад настанд 0.130×10^{-3} хамгийн бага утгатай байв. Медиан

утгын хувьд мөн ижил хандлага ажиглагдаж, хүүхдийн бүлэг 0.462×10^{-3} -аар хамгийн өндөр, ахмадын бүлэг 0.128×10^{-3} -аар хамгийн бага үзүүлэлттэй байна. Стандарт хазайлтын үр дүнгээс хүүхдийн бүлэгт 0.060×10^{-3} бөгөөд бусад бүлгээс өндөр байгааг харуулж байгаа бол ахмад настанд хамгийн бага буюу 0.017×10^{-3} байгаа нь ажиглагдав. ELCR-ийн хамгийн их утга хүүхдийн бүлэгт 0.855×10^{-3} , ахмадын бүлэгт 0.238×10^{-3} байна.

Эндээс эмэгтэйчүүд болон хүүхдийн бүлэгт ELCR-ийн түвшин харьцангуй өндөр байгаа нь тэдний цацрагийн нөлөөлөлд өртөмтгий байдлын ялгааг харуулж байна.



Зураг 3. Нас, хүйсээс хамаарсан ELCR-ийн утга

Зураг 3-аас ELCR-ийн утга хүүхдийн бүлэгт хамгийн өндөр, ахмад настанд хамгийн бага байгааг харж болно. Эмэгтэйчүүдийн ELCR бүх хэмжилтийн цэгт эрэгтэйчүүдээс өндөр түвшинд байгаа нь ажиглагдав. Энэ нь нас, хүйсээс хамаарсан эрсдэлийн коэффициентийн ялгаатай холбоотой юм.

Улаанбаатар хотын хөрснөөс үүсэх байгалийн гамма цацраг нь хүн амын эрсдэлийн коэффициентээр тооцоход дунджаар ноцтой эрүүл мэндийн эрсдэл үүсгэхгүй байгаа мэт боловч нас, хүйсээс хамаарсан эрсдэлийн коэффициентээр тооцоход бүх хэмжилтийн цэгт хүүхэд, эмэгтэйчүүдэд өндөр байна. Энэ нь цаашдын байнгын мониторинг шаардлагатай байгааг илтгэнэ.

Энэхүү судалгаа нь хөрсний гамма цацрагийн эрсдэлийг үнэлэх зорилготой байсан болно. Харин цацрагийн нийт өртөлтийн илүү иж бүрэн үнэлгээ хийх зорилгоор радонтой холбоотой өртөлтийн замыг цаашдын судалгаанд дотор орчны радон (indoor air radon), ундны усны радон, мөн бусад өртөлтийн замуудыг хамруулсан судалгааг үе шаттайгаар хэрэгжүүлэх шаардлагатай гэж үзэж байна.

D. Монте Карло эргэлзээний шинжилгээ

Энэхүү судалгаанд 2025 онд Улаанбаатар хотын хэмжээнд авсан 180 хөрсний дээжийн ^{226}Ra , ^{232}Th болон ^{40}K -ийн хувийн идэвхжилийг ашиглан цацрагийн үзүүлэлтүүдийн эргэлзээг Монте Карлогийн симуляцийн аргаар үнэлэв. Энэхүү арга нь оролтын хувьсагчдын эргэлзээ эцсийн үр дүнд хэрхэн нөлөөлж байгааг магадлалт тархалтын үндсэн дээр үнэлэх боломж олгодог бөгөөд хөрсний гамма цацрагийн эрсдэлийн үнэлгээнд өргөн хэрэглэгддэг [10-12].

Монте Карло шинжилгээний оролтын хувьсагчдаас гаралтын хувьсагч руу эргэлзээ дамжих үйл явцын үр дүнг ашиглан харьцангуй стандарт эргэлзээ болон өргөтгөсөн эргэлзээг дараах томъёогоор үнэлэв.

1. Харьцангуй стандарт эргэлзээг дараах байдлаар тооцов:

$$u_r(\%) = \frac{u(x)}{\bar{x}} \times 100 \quad (4)$$

Энд u_r - харьцангуй стандарт эргэлзээ (%), $u(x)$ - стандарт эргэлзээ бөгөөд $u(x)$ - Монте Карло симуляциар гарсан стандарт эргэлзээ нь $SD_{\text{Монте Карло}}$ -тэй тэнцүү, $\bar{x}$ - дундаж утгыг илэрхийлнэ.

Монте Карло симуляцийн явцад оролтын хувьсагч бүрийг хэвийн тархалт гэж үзэн 10,000 санамсаргүй түүвэрлэлт үүсгэж, тухайн давталт бүрт цацрагийн үзүүлэлтүүд болох агаарт үүсэх шингэсэн тунгийн чадал (D_{out})-ыг (1), жилийн эффектив тун (E_{out})-г (2), болон ELCR-ийг (3) томъёогоор тус тус тооцоолов.

2. Өргөтгөсөн эргэлзээ:

$$U = k \times u(x) \quad (5)$$

Энд U - Өргөтгөсөн эргэлзээ, $k = 1.96$ - 95%-ийн итгэлцлийн түвшинд харгалзах коэффициент, $u(x)$ - стандарт эргэлзээ юм. Мөн 95%-ийн итгэлцлийн интервал:

$$95\% \text{ CI} = \bar{x} \pm 1.96 \times \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Энд $\bar{x}$ - дундаж утга, SD - стандарт хазайлт, n - хэмжилтийн тоо (180) юм.

Монте Карло симуляцийн үр дүнд 2025 оны 180 хэмжилтийн цэгийн цацрагийн үзүүлэлтүүд болон 95%-ийн тархалтын доод, дээд хязгаарыг тодорхойлж хүснэгт 3-аар харуулав.

Үзүүлэлт	D_{out} , нГр/ц	E_{out} , мЗв/жил	ELCR $\times$ 10^{-3}
Дундаж	52.974	0.075	0.261
SD	7.090	0.010	0.035
Медиан	52.133	0.074	0.257
Доод 95% CI	42.315	0.060	0.209
Дээд 95% CI	66.171	0.093	0.327

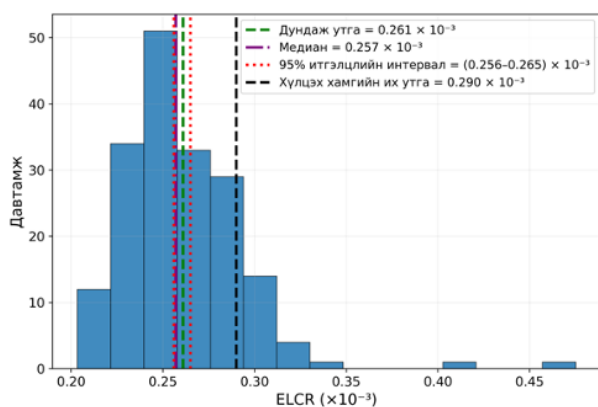
Хүснэгт 3. Цацрагийн статистик үзүүлэлтүүд

Хүснэгт 3-аас харахад медиан болон дундаж утгууд ойролцоо байгаа нь ELCR-ийн тархалт харьцангуй симметр, мэдэгдэхүйц өндөр хэлбийлтгүй болохыг илтгэнэ [10].

Хүснэгтээс харахад шинжилгээний үр дүнд агаарт үүсэх гамма цацрагийн шингэсэн тунгийн чадал (D_{out}) нь 52.974 ± 7.090 нГр/ц, жилийн эффектив тун (E_{out}) нь 0.075 ± 0.010 мЗв/жил байв. Харин ELCR нь $(0.261 \pm 0.035) \times 10^{-3}$ гэж үнэлэгдэв. Монте Карло симуляцийн үр дүнд үүссэн нийт өгөгдлийн 95%-ийн тархалтын хязгаар (Coverage interval) нь $(0.209-0.327) \times 10^{-3}$ хооронд хэлбэлзэж байсан нь зарим тохиолдолд олон улсын хүлцэх хамгийн их утгаас өндөр гарах боломжтойг харуулж байна. Харин 180 цэгийн хэмжилтэд суурилсан дундаж утгын 95%-ийн итгэлцлийн интервал (Confidence interval) нь $(0.256-0.265) \times 10^{-3}$ байна. Итгэлцлийн интервал нь дундаж ELCR-ийн үнэлгээний нарийвчлалыг, харин тархалтын хязгаар нь Монте Карло симуляциар үүссэн ELCR тархалтын 95%-ийг илэрхийлнэ.

2025 оны ELCR-ийн харьцангуй стандарт эргэлзээ 6.4% (Энэ нь ELCR-ийн хэмжилтийн цэгүүдийн стандарт хазайлтаас бус, Монте Карло симуляцийн үр дүнд гарсан ELCR-ийн тархалтын стандарт хазайлт SD_{MC} -ыг үндэслэн тооцоологдсон болно). Өргөтгөсөн эргэлзээ ($k = 1.96$) 12.5% байсан нь үр дүнгийн найдвартай байдлыг хангаж байгааг харуулж байна. ELCR-ийн дундаж утга 0.261×10^{-3} нь олон улсын хүлцэх хамгийн их утга болох 0.29×10^{-3} -аас бага байсан бөгөөд эргэлзээний хүрээг тооцсон ч судалгааны бүс нь хэвийн орчны цацрагийн ангилалд хамаарч байна [10-12].

ELCR-ийн магадлалт тархалтын гистограммыг Зураг 4-өөр үзүүлэв. Уг зурагт ногоон босоо шугам нь ELCR-ийн дундаж утгыг, тасархай улаан шугамууд нь 95%-ийн итгэлцлийн интервалыг, ягаан шугам нь медианыг, саарал тасархай шугам нь олон улсын хүлцэх хамгийн их утга (0.29×10^{-3}) -ыг тус тус илэрхийлнэ. Үүнээс харахад зарим цэгүүдийн ELCR утга хүлцэх хамгийн их утгаас өндөр байна.



Зураг 4. ELCR-ийн магадлалт тархалтын гистограмм

III. ДҮГНЭЛТ

1. Судалгааны үр дүнгээс харахад Улаанбаатар хотын хөрсний байгалийн цацраг идэвхт изотопуудын хувийн идэвхжил болон цацрагийн үзүүлэлтүүд 2025 онд харьцангуй тогтвортой байгаа нь ажиглагдлаа.

2. ELCR-ийн дундаж утга 180 цэгийн хэмжилтээр хүн амын эрсдлийн коэффициентээр тооцоход дунджаар 0.261×10^{-3} байсан бөгөөд энэ нь олон улсын хүлцэх хамгийн их утга 0.29×10^{-3} -аас бага байна. Гэсэн хэдий ч цөөн тооны байршилд харьцангуй өндөр ELCR утга ажиглагдсан тул тухайн цэгүүдэд цаашид тогтмол мониторинг хийх шаардлагатай.

3. Нас, хүйсээс хамаарсан эрсдэлийн коэффициентээр тооцоход хүүхдийн ELCR хамгийн өндөр, дараа нь эмэгтэйчүүдийн ELCR өндөр гарсан бол эрэгтэй болон ахмад бүлгийн ELCR утгууд харьцангуй бага байна. Ялангуяа хүүхэд болон эмэгтэйчүүдийн бүлэгт хэмжилтийн цэгүүдэд ELCR олон улсын хүлцэх хамгийн их утгаас давсан нь хүн амын бүлгээр ялгасан эрсдэлийн үнэлгээг тогтмол хийх шаардлагатайг харуулж байна.

4. Монте Карло симуляцид суурилсан эргэлзээний шинжилгээгээр D_{out} , E_{out} болон ELCR үзүүлэлтүүдийн харьцангуй стандарт эргэлзээ 6.4%, өргөтгөсөн эргэлзээ ($k=1.96$) 12.5% байсан нь судалгааны үр дүн хүлээн зөвшөөрөгдөх найдвартай түвшинд байгааг харуулж байна.

5. Улаанбаатар хотын хэмжээнд хөрсний гамма цацрагийн түвшнийг олон цэгийн хэмжилтэд тулгуурлан үнэлэх нь цацрагийн аюулгүй байдлын хяналтыг сайжруулах, эрсдэлийн

үнэлгээг бодит өгөгдөлд суурилан хийхэд чухал ач холбогдолтой юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, Annexes A and B, United Nations, New York, 1988, 1993, 2000, 2008, 2011.
- [2] MNS 5626:2006, *Цацрагийн хамгаалалт: Лабораторийн гаммаспектрометрийн арга*, Стандартчилал, хэмжилзүйн үндэсний төв, Улаанбаатар хот, 2006 он
- [3] International Commission on Radiological Protection (ICRP), *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 103, *Annals of the ICRP*, vol. 37, nos. 2-4, 2007.
- [4] ISO 18589-3:2023, *Measurement of Radioactivity in the Environment-Soil-Part 3: Gamma Spectrometry for the Determination of Radionuclides*, International Organization for Standardization (ISO), Geneva, 2023.
- [5] *Цацрагийн аюулгүйн норм*, Цөмийн энергийн комисс, Улаанбаатар, Монгол Улс, 2015.
- [6] S. Batmunkh, Z. Battogtokh, and B. Erdev, "An investigation of soil radiation levels in the territory of Ulaanbaatar city," *Energy Systems Research*, vol. 8, no. 4, 2025. doi:10.25729/esr.2025.04.0004.
- [7] Taskin, H., Karavus, M., Ay, P., Topuzoglu, A., Hidioglu, S., Karahan, G. (2009). Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kırklareli, Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, 100(1), 49–53.
- [8] Berisha et al. (2022) Natural radioactivity and radiological assessment of soils in Kosovo. *Applied Sciences*, 12, 9520.
- [9] B. Dorjsuren et al., "Radioactive levels and human health effects in a dumpsite in Ulaanbaatar City, Mongolia," *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, vol. 26, no. 4, 2022.
- [10] S. Gallardo et al., "Uncertainty analysis in environmental radioactivity measurements using the Monte Carlo code MCNP5," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 105, pp. 35–41, 2015.
- [11] JCGM 101:2008, *Evaluation of Measurement Data-Supplement 1 to the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement"-Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method*, Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- [12] J.R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd ed., University Science Books, California, 1997.

Assessment of Soil Gamma Radiation Risk in Ulaanbaatar City

B. Erdev^{a*}, S. Batmunkh^a, Z. Battogtokh^a

^a *Mongolian University of Science and Technology, Institute of Thermal Engineering
and Industrial Ecology, Ulaanbaatar, Mongolia*

Abstract

This study assessed the Excess Lifetime Cancer Risk (ELCR) associated with environmental gamma radiation from soil in densely populated areas of Ulaanbaatar, Mongolia. Soil samples collected in 2025 from sampling locations arranged on a 1-km grid were analyzed using an accredited gamma spectrometry laboratory at the National Institute of Nuclear Science and Technology, National University of Mongolia. Based on the measured radionuclide concentrations, the annual effective dose (E_{out}) and ELCR were calculated. Monte Carlo simulation was applied to evaluate the distribution of the results and measurement uncertainty.

The average ELCR estimated using the population risk coefficient was 0.261×10^{-3} in 2025, which was lower than the internationally accepted reference level of 0.290×10^{-3} . However, age- and gender-specific risk assessment showed that ELCR was highest for children, followed by females. The estimated ELCR for children exceeded the reference level at all sampling locations, while that for females exceeded the reference level at most locations. These findings indicate the need for continued monitoring and more detailed risk assessment for vulnerable population groups and locations with elevated ELCR values.

This study provides important baseline information on soil gamma-radiation risk in Ulaanbaatar and contributes to long-term environmental radiation monitoring and radiological risk assessment.

Keywords: soil gamma radiation, outdoor external absorbed dose rate, annual effective dose-outdoor, Excess lifetime cancer risk (ELCR), Monte Carlo simulation