

Гуулин аяганд хадгалсан усны цайрын баяжилтыг хугацаанаас хамааруулан рентген флуоресценцийн шинжилгээний аргаар тодорхойлсон үр дүн

Э.Сосорбурам^{1*}, Ц.Амартайван², Д.Болортуяа¹

¹Монгол Улсын Их Сургууль, Цөмийн физикийн судалгааны төв

²Монгол Улсын Их Сургууль, Шинжлэх ухааны сургууль, Физикийн тэнхим.

ХУРААНГУЙ Энэхүү судалгаанд рентген флуоресценцийн шинжилгээний арга ашиглан тасалгааны температурт гуулин аяганд ундны усыг хадгалан цайрын баяжилтын агуулгыг дотоод стандартын аргаар тодорхойлов. Гуулин аяганд 100 мл ундны усыг хийж нийт 16 хоног хадгалан 24, 48 цагийн давталтаар 1 мл усыг соруулан хуруу шилэнд хадгалав. Нийт 10 хэмжилтийн уусмал бэлтгэн цайрын агуулгыг тодорхойлоход хяналт буюу анх гуулин аяганд хийсэн ундны усанд 0.46 мг/л, 2-оос 16 хоногт хадгалахад 2 мг/л -ээс 13 мг/л хүртэл цайраар баяжсан байв. Мөн бид 1мг/л, 5 мг/л, 10 мг/л агуулгатай цайрын стандарт уусмалыг хэмжихэд эргэлзээний муж 7-9% байв.

Түлхүүр үг: Усны элементийн агуулга, рентген флуоресценцийн шинжилгээ, элементийн шинжилгээ, дотоод стандартын арга, гуулин аяганд хадгалсан усны цайрын баяжилт

I. УДИРТГАЛ

Рентген флуоресценцийн шинжилгээ (РФС) нь хатуу, шингэн дээжийн элементийн агуулгыг тодорхойлоход өргөн хэрэглэгддэг дээж бэлтгэл бага шаарддаг, богино хугацаанд олон элементийг нэгэн зэрэг тодорхойлох гэх мэт олон давуу талтай шинжилгээний арга юм. Ердийн энергиэр ялгах рентген флуоресценцийн спектрометрээр шингэн дээжид шинжилгээ хийх үед дээж бэлтгэл, хэмжилттэй холбоотой зарим бэрхшээл тулгардаг. РФС-ний аргаар шингэн дээжид шинжилгээ хийх арга зүйг боловсруулав [1,2].

Цайр нь хүний биеийн дархлааны хариу урвал, эсийн бодисын солилцоо, шарх эдгэрэлтийг хурдасгах зэрэг олон физиологийн процессуудад зайлшгүй шаардлагатай амин чухал микро элемент юм. Цайр дутагдсанаар дархлаа сулрах, шархны эдгэрэлт удаашрах, өсөлт буурах эрсдэлтэй [3].

Дэлхийн Эрүүл Мэндийн Байгууллага (ДЭМБ) ундны усан дахь цайрын эрүүл мэндэд үзүүлэх нөлөөг тодорхой заагаагүй боловч 3 мг/л-ээс дээш концентраци нь тааламжгүй амт, үзэмжийг үүсгэж болзошгүй гэж зөвлөж байна [4]. Харин АНУ-ын Үндэсний Эрүүл Мэндийн Хүрээлэн (ҮЭМБ) хүлцэх хэмжээнд насанд хүрсэн эрэгтэйчүүдэд өдөрт 11 мг,

насанд хүрсэн эмэгтэйд 8 мг, зөвшөөрөгдөх дээд хэмжээнд насанд хүрэгчдэд өдөрт 40 мг тунгаар хэрэглэхийг зөвлөдөг [5].

Хоол тэжээлийн үүргээс гадна цайр нь нянгийн эсрэг шинж чанартай байдаг. Цайрын ионууд (Zn^{2+}) болон цайрын исэл (ZnO) нь бактерийн мембраныг гэмтээж улмаар бичил биетнийг дарангуйлнаар усны чанарыг сайжруулан цэвэршүүлдэг. Бусад [6, 7] судалгаануудын үр дүнгээс харахад цайрын нян устгах нөлөө нь концентрацаас хамааралтай бөгөөд хамгийн бага дарангуйлах агуулга нь бичил биетний омог болон туршилтын нөхцөлөөс хамааран 3.9 мг/л-ээс 1600 мг/мл хүртэл хэлбэлздэг. Тухайлбал 3.9 мг/л агуулга бүхий цайрын исэл эмгэг үүсгэгч *Staphylococcus aureus* бактерийг, 25-50 мг/л агуулга бүхий цайрын исэл *Campylobacter jejuni* бактериудыг устгахад тус тус үр дүнтэй байжээ [6,7]. Түүнчлэн цайраар баяжуулсан усыг хоол хүнснээс гадна шарх халдваргүйжүүлэлт, хөдөө аж ахуйд ургамлын ургалтад ашиглах зэрэг олон төрлийн хэрэглээтэй [8,9].

Гуулин аяга, халбагыг хоол хүнсний хэрэгслээр ашиглах нь эрүүл мэндэд ач тустай хэмээн үзэж өргөнөөр хэрэглэдэг. Гууль нь зэс (Cu) (нийт химийн найрлагын 2/3-ийг эзэлнэ) болон цайр (Zn)-аас (нийт химийн найрлагын

* Electronic address: Sosorburam.e@num.edu.mn

1/3-ийг эзэлнэ) бүрдэх хайлш метал юм. Гуулийг ус дамжуулах хоолойнд ашиглах үед 20 мкс/см хурдтай ундны ус 12 цагт зэсээр 7 мкл/л цайраар 26 мкл/л хүртэл баяжсан байгааг судалгаагаар тогтоожээ [10]. Ийнхүү ундны ус нь байгалийн эрдсийг уусгах эсвэл цайртай хоолой зэрэг цайр агуулсан материалаас баяжих замаар цайрын нэмэлт эх үүсвэр болдог байна.

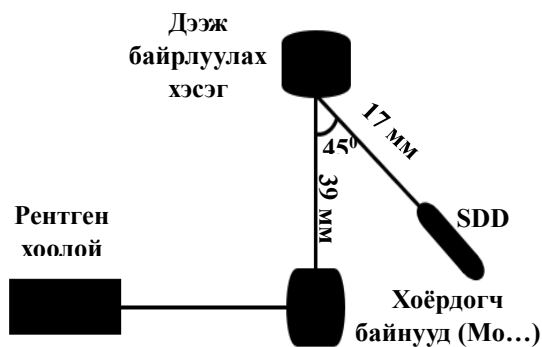
Бид өмнөх судалгаагаар [1,2] боловсруулсан SpectroXeros рентген спектрометрээр усан уусмалын элементийн агуулгыг тодорхойлох дотоод стандартын арга зүйг ашиглан гуулин аяганд хадгалсан ундны усны цайрын баяжилтын агуулгыг тодорхойлно.

II. ТУРШИЛТЫН ХЭСЭГ

1. Spectro-Xeros рентген спектрометр

Энергийг ялгах SpectroXeros рентген-флуоресценцийн спектрометр нь вакуум системтэй, дөрвөн төрлийн туйлширсан болон хоёрдогч бай, Pd (21.12 кэВ) анодтой рентген хоолой, Пелтьер хөргөлттэй, Mn-Kα шугамд (5.9 кэВ) 155 эВ энергийн ялгах чадвартай, Та коллиматертай, хагас дамжуулагч Цахиур-Дрифт детектор (SDD)- тэй.

Мөн энэ спектрометр нь натри (Na)-аас уран (U) хүртэлх элементүүдийг тодорхойлох боломжтой юм. Спектрометрийн бүдүүвч зургийг Зураг 1-т үзүүлэв.



Зураг 1. Spectro Xeros спектрометрийн хэмжилтийн схем

Тус спектрометр нь рентген хоолойд хүчдэлийг 5-50 кэВ мужид, гүйдлийг 0.15-2 мА мужид тохируулдаг. Мо, Со, Al₂O₃, НОРГ хоёрдогч болон туйлширсан байнуудаас хэрэглээнд тохируулан сонгоно.

2. Дээж бэлтгэл

Бид үр дүнгээ хянан баталгаажуулахын тулд Холбооны Бүгд Найрамдах Герман Улсын Мерк компанид үйлдвэрлэсэн тус бүр нь 1000 мг/л агуулгатай цайрын стандарт уусмалыг ашиглан харьцуулах уусмал бэлдэв.

Мөн энэхүү судалгаанд худалдаанд зарагддаг гуулин аягыг ашиглав. Гуулин аяганд 100 мл цэвэр ус хийж битүүмжлэн тасалгааны температурт 16 хоног хадгалав. Хадгалсан уснаас 1 мл дээжийг 24, 48 цагийн давталтаар соруулан авч цэвэр хуруу шилэнд хадгалан нийт 10 уусмалыг цуглуулав.

Уусмалуудыг бэлдэх цилиндр сав болон уусмалыг хатааж хэмжих 24 мм голчтой кварцан суурийг нэрмэл усаар угааж цэвэр спиртээр арчиж бэлдэв. Хэмжилтэд 50, 100, 900 мкл-ийн дусаагуур, Vortex сэгсрэгч, UV гэрэл ашиглан уусмалуудыг бэлдэв. Уусмал бэлдэх дарааллыг Зураг 2-т харуулав.

Цайрын стандарт уусмалыг ашиглан харьцуулах уусмалыг бэлтгэхдээ цэвэр цилиндр саванд 900 мкл нэрмэл усыг соруулан юулж, урьдчилан бэлдсэн стандарт уусмалаас 100 мкл-ийг соруулан цилиндр савтай нэрмэл усанд нэмж, Vortex автомат сэгсрэгчээр нэгэн төрөл болгон нийт 100 мг/л агуулгатай 1 мл уусмал бэлдэв.



Зураг 2. Дээж бэлтгэх дараалал.

Үүний дараа сулруулан бэлдсэн харьцуулах уусмалыг дахин сулруулж 1 мг/л, 5мг/л, 10мг/л агуулга бүхий уусмалуудыг бэлдэн хэмжив. Харин цайраар баяжуулсан судалгааны уусмалыг сэгсрэгчээр нэгэн төрөл болгон бэлтгэв.

Бэлдсэн уусмалуудаас дусаагуураар 50 мкл-ийг соруулан 24 мм голчтой кварц суурийн голд дусаан гэрлээр шарж хатаав. Харьцуулах уусмал тус бүрээс 10, судалгааны уусмал тус бүрээс 3 нийт 40-н хэмжилтийн дээж бэлтгэв.

3. Хэмжилт

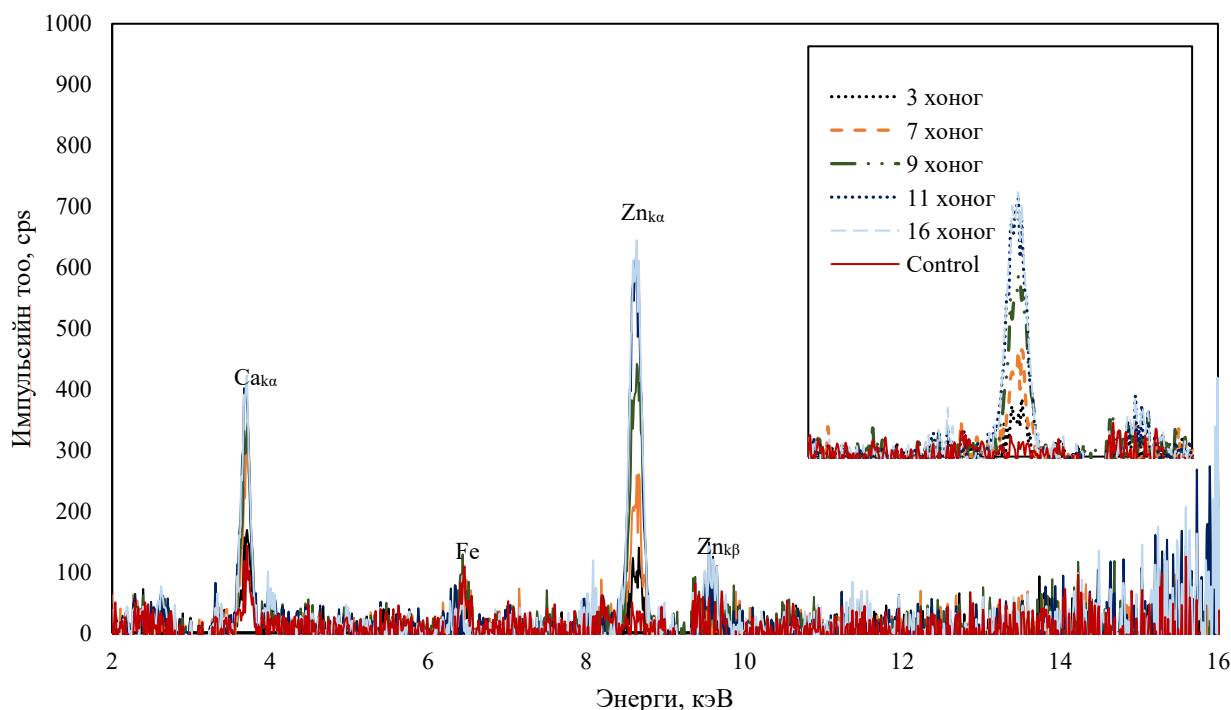
Бэлтгэсэн дээжийг хэмжихээс өмнө цэвэрлэж бэлдсэн кварц суурийн рентген спектрийг хэмжив. Хэмжилтийн хүчдэл 40 кВ, гүйдэл 0.88 мА бөгөөд 17.44 кэВ $K\alpha$ тодорхойлогч рентген энергитэй Мо байгаар өдөөж 300 с хэмжив. Хэмжилтийн спектрийг Зураг 3-т харуулав. Спектрт Zn-ын 8.63 кэВ $K\alpha$ рентген шугамаас гадна усны үндсэн элемент Fe-ийн 6.40 кэВ рентген шугам, Са-ын 3.69 кэВ $K\alpha$ рентген шугамууд илрэв.

Дээжид агуулагдах i дугаар элементийн агуулгыг дотоод стандартын j дүгээр элементэд харьцуулан тодорхойлбол:

$$C_i = C_j \frac{I_1(E_i)A_i\varepsilon(E_j)\sigma_{E_j}}{I_{st}(E_j)A_j\varepsilon(E_i)\sigma_{E_i}} \quad (1)$$

болно [11].

Үүнд C_i, C_j – дээжид агуулагдах i болон j дүгээр элементийн агуулга, $I_1(E_i), I_{st}(E_j)$ – i болон j дүгээр элементийн хувьд хэмжсэн тодорхойлогч цацрагийн эрчим, A_i, A_j – i болон j дүгээр элементийн атом масс, $\varepsilon(E_j), \varepsilon(E_i)$ – i болон j дүгээр элементийн тодорхойлогч рентген цацрагийн энергид харгалзах детекторын бүртгэх чадвар [2], $\sigma_{E_i}, \sigma_{E_j}$ – E_i болон E_j энергитэй тодорхойлогч рентген цацрагийн иончлолын хөндлөн огтлолыг [12] онолын утгыг авч ашиглав.



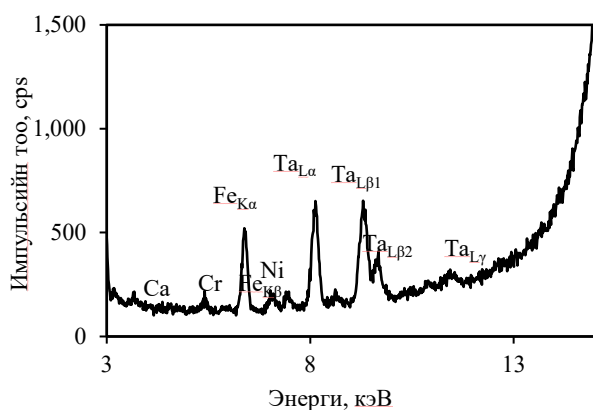
Зураг 3. Харьцангуй рентген спектр .

4. Элементийн агуулга тодорхойлох дотоод стандартын арга

ОУАЭА-аас гаргасан QXAS (AXIL) спектр боловсруулах программ, Spectro-Xepos багажийн XlabPro5.1 болон MS Excel программуудыг ашиглан хэмжсэн рентген спектрийг боловсруулан бүртгэгдсэн элемент бүрийн $K\alpha$ тодорхойлогч рентген шугамын эрчмийг тодорхойлов.

Бид өмнөх судалгаагаар спектрометрийн фонын спектр (Зураг4)-д илрэх детекторын коллиматорын материал Тантал (Ta)-ын пикд харгалзах агуулгыг тодорхойлон дотоод стандарт элемент болгон ашиглах арга зүйг боловсруулсан билээ [1].

Хэмжилтийн фонын спектрийг Зураг 4-д харуулав.



Зураг 4. Спектрометрийн фонын спектр

SpectroХeros спектрометрийн хагас дамжуулагч SDD-д Тантал коллиматортой учир фонын спектрт Та-ын L шугамууд үүнээс гадна Fe, Ni, Cr илэрдэг. $Ta_{L\alpha}$ (8.14 кэВ) рентген шугам нь $Cu_{K\alpha}$ (8.04 кэВ) рентген шугамтай харин $Ta_{L\beta}$ (9.34 кэВ) рентген шугам нь $Ga_{K\alpha}$ (9.24 кэВ) рентген шугамуудтай тус тус давхацдаг. Энд 50 мкл уусмал хэмжих үед детекторын коллиматорийн материал Та-ын L_{β} (9.34 кэВ) рентген шугамын бүртгэгдсэн 7870 эрчимд харгалзах агуулга 28 мг/л байв. Ийнхүү бид $Ta_{L\beta}$ шугамыг дотоод стандарт элемент болгон тухайн элементийн агуулгыг дараах тэгшитгэлээр тодорхойлно.

$$C_i = C_{Ta} \frac{I_1(E_i)}{I_{Ta}(E_j)} \frac{A_z}{A_{Ta}} \frac{\epsilon(E_{Ta})}{\epsilon(E_i)} \frac{\sigma_{Ta}}{\sigma_{Ei}} \quad (2)$$

5. Эргэлзээний муж

Эргэлзээний мужийг дээж бэлдэхээс эхлээд хэмжилт, боловсруулалт хийн эцсийн үр дүн гарах хүртэлх бүх үе шат бүрд гарч болох алдаануудыг тооцон тодорхойлно.

Уусмал бэлтгэх, хэмжсэн спектрийн фон, хэмжилт, боловсруулалтыг тус бүр 10 удаа хийж үнэмлэхүй алдааг $P=0.95$ магадлалаар тооцно.

Энэ тохиолдолд хэмжилтийн нийт эргэлзээг дараах тэгшитгэл ашиглан үнэлнэ:

$$\Delta\epsilon = \sqrt{\Delta\epsilon_{уус}^2 + \Delta\epsilon_{хэм}^2 + \Delta\epsilon_{бол}^2} \quad (3)$$

Үүнд $\Delta\epsilon$ -хэмжилтийн нийт эргэлзээ, $\Delta\epsilon_{уус}$, $\Delta\epsilon_{хэм}$, $\Delta\epsilon_{бол}$ - тус тус уусмал бэлдэх, хэмжих, спектр боловсруулах үеийн алдаа.

III. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Харьцуулах уусмалын Zn агуулгыг (2) тэгшитгэлээр боловсруулсан үр дүнг Хүснэгт 1-т харуулав.

Хүснэгт 1. Цайрын харьцуулах уусмал хэмжсэн дүн

Стандарт утга мг/л	Хэмжсэн утга мг/л	ϵ_y , %	$\epsilon_{хэм}$, %	$\epsilon_{бол}$, %	ϵ_n , %
10	9.7	6	5	1	8
5	4.7		6	2	9
1	1.1		2	4	7

Уусмал бэлдэхэд ашигласан дусаагуурыг 50 мкл, 100 мкл, 900 мкл-ээр 10 удаа нэрмэл ус соруулан стандарт хэмжил зүйн газраас баталгаажуулсан МЭЛ-0151:2024 дугаар бүхий гэрчилгээтэй, 0.0001 нарийвчлалтай электрон жингээр хэмжиж уусмал бэлтгэлийн эргэлзээг олов. Уусмал бүрээс хэмжилтийн 10 дээж бэлтгэж хэмжилтийн эргэлзээг тодорхойлсон. Харин боловсруулалтын эргэлзээг бид өмнөх судалгаанд тодорхойлсон дотоод стандарт элемент Та эргэлзээгээр тооцов. Та-ийн хувьд хэмжилтийн эргэлзээ болон боловсруулалтын эргэлзээ тус бүр 1%-тай, Та тодорхойлоход ашигласан уусмалын дээж бэлтгэлийн алдаа 6%, шууд хэмжилтийн нийт эргэлзээний муж 6% байв.

Нийт эргэлзээний мужийг (3) томъёогоор тодорхойлов.

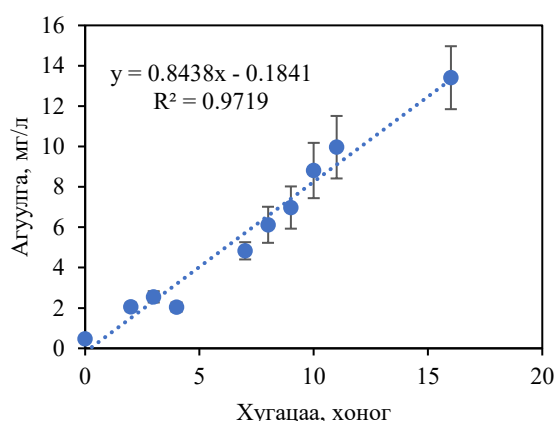
Зураг 3-т харуулсан улаан зураасаар тэмдэглэсэн хяналтын дээж болон гуулин аяганд хадгалсан усны дээжүүдийн хэмжсэн хэмжилтийн спектрүүдийг харахад ундны ус цайраар баяжсан байв. Харьцуулах уусмалын хэмжилтийн үр дүнг боловсруулсны дараа судалгааны дээжүүдэд агуулагдах Цайрын агуулгыг (2) тэгшитгэлээр тодорхойлсон дүнг Хүснэгт 2-т үзүүлэв.

Хүснэгт 2. Гуулин аяганд хадгалсан усны цайрын агуулга тодорхойлсон дүн

Хугацаа (өдөр)	Агуулга (мг/л)	Усны хэмжээ (мл)	Цайрын масс (мг)
0	0.46±0.01	100	0.1
2	2.1±0.2	99	0.2
3	2.6±0.3	98	0.3

4	2.0±0.2	97	0.2
7	4.8±0.4	96	0.5
8	6.1±0.9	95	0.6
9	7.0±1.0	94	0.7
10	8.8±1.4	93	0.8
11	10.0±1.5	92	0.9
16	13.4±1.6	89	1.2

Зураг 5-г цайрын агуулга хугацаанаас хамаарсан графикийг байгуулан хамаарлын тэгшитгэл болон регрессийн коэффициентийг олсон дүнг харуулав.



Зураг 5. Цайрын агуулга хугацаанаас хамаарсан график

Зураг 5-ийн үр дүнг харахад гуулин аяганд хадгалсан усны цайрын агуулга болон хадгалалтын хугацаа шугаман хамааралтай байна. Мөн 16 хоногийн туршид цайрын агуулга хоногт дунджаар 0.8438 мг/л-аар өссөн бөгөөд хадгалах хугацаа болон цайрын баяжилт хооронд маш өндөр хамаарал ($R^2 = 0.9719$) байгааг илтгэж байна.

IV. ДҮГНЭЛТ

SpectroXepos спектрометрээр шингэн дээжид шинжилгээ хийх арга зүйг ашиглан гуулин аяганд хадгалсан усан дах цайрын агуулгыг тодорхойлов.

Ундны ус гуулин аяганд 2 хоног хадгалагдахад цайрын агуулга 2 мг/л хүртэл баяжсан бол 16 хоног хадгалагдахад 13 мг/л хүртэл баяжсан байв. Цайрын агуулгыг тооцоход нийт эргэлзээний муж 9-16% байв.

Судалгааны үр дүнгээс харахад хүн өдөрт дунджаар 2 л ус уух шаардлагатай гэж үзвэл АНУ-ын ҮЭМБ зөвлөмжийн дагуу насанд хүрсэн эрэгтэй хүн 11 мг цайрын тун авахын

тулд гуулин аяганд усыг 7-8 хоног насанд хүрсэн эмэгтэй 3-7 хоног тус тус хадгалан уух нь тохиромжтой байна.

Цайрын агуулга тодорхойлсон үр дүн нь энэхүү судалгаанд ашигласан арга зүйгээр цаашид шингэн дээжид шинжилгээ хийх боломжтойг харуулж байна.

V. АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] Э. Сосорбурам, SpectroXepos Спектрометрийн Хэрэглээг Өргөжүүлэх Боломж, Цөмийн Технологийн Магистрын Зэрэг Горилсон Бүтээл, Монгол Улсын Их Сургууль, 2025.
- [2] Э. Сосорбурам, Ц. Амартайван, and Д. Болортуяа, SpectroXepos спектрометрийн детекторын бүртгэх чадварыг тодорхойлсон үр дүн, Физик, Технологийн Хүрээлэнгийн Бүтээл №51 23 (2025).
- [3] R. A. Catharine, B. Caballero, R. J. Cousins, K. L. Tucker, and T. R. Ziegler, Modern Nutrition In Health and Disease, 2012.
- [4] World Health Organization, Zinc in Drinking-Water: Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality, 2003.
- [5] National Institutes of Health and Office of Dietary Supplements, Zinc – Fact Sheet for Health Professionals, 2022.
- [6] Y. Xie, Y. He, P. Irwin, T. Jin, and X. Shi, Antibacterial Activity and Mechanism of Action of Zinc Oxide Nanoparticles Against Campylobacter jejuni, Appl Environ Microbiol **77**, 2325 (2011).
- [7] M. T. Elabbasy et al., Antibacterial and Antibiofilm Activity of Green-Synthesized Zinc Oxide Nanoparticles Against Multidrug-Resistant Escherichia coli Isolated from Retail Fish, Molecules **30**, (2025).
- [8] E. A. S. Dimapilis, C. S. Hsu, R. M. O. Mendoza, and M. Lu, Zinc Oxide Nanoparticles for Water Disinfection,

Sustainable Environment Research **28**, 47 (2018).

- [9] C. R. Mendes, G. Dilarri, C. F. Forsan, V. M. R. Sapata, P. R. M. Lopes, R. N. Montagnolli, H. Ferreira, and E. D. Bidoia, Antibacterial Action and Target Mechanisms of Zinc Oxide Nanoparticles Against Bacterial Pathogens, *Sci Rep* **12**, 2658 (2022).
- [10] C. Vilarinho, D. Soares, J. Barbosa, and F. Castro, Leaching of brassy in long-term direct contact with water, *Materials Science Forum* **455–456**, 839 (2004).
- [11] S. Limandri, G. Bernardi, and S. Suárez, Experimental Study of the Efficiency of a SDD X-ray Detector by Means of PIXE Spectra, *X-Ray Spectrometry* **42**, 487 (2013).
- [12] S. Puri, B. Chand, D. Mehta, M. L. Garg, S. Nitman, and P. N. Trehan, K and L shell X-Ray fluorescence cross sections, *At Data Nucl Data Tables* **61**, (1995).