

**МОНГОЛ ОРНЫ ЗАРИМ ТАЛБАЙНУУДАД ТАРХСАН МАГМЫН БОЛОН  
ТУНАМАЛ ЧУЛУУЛГУУДЫН ЦИРКОНЫ ТН/У-НЫ ХАРЬЦАА БОЛОН  
ДОТООД БҮТЦИЙН СУДАЛГАА**

*Содномын Оюунгэрэл<sup>1</sup>\*, Лувсанчүлтэмийн Жаргал<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Монгол Улсын Их Сургууль, Шинжлэх Ухааны Сургууль, Геологи-Геофизикийн тэнхим*

---

**ABSTRACT**

We investigated the zircon Th/U ratios and their internal textures from more than 60 magmatic rocks and a few sedimentary rocks which are collected from different areas of Mongolia such as the Tavit ore field, the Dzuun mod areas, and others. All these zircon samples were photographed in SEM images, backscattered (BSE) and cathodoluminescence (CL) images that are used to examine the internal texture of the analyzed zircons and with petrographic observations guided the selection of analytical spots, using a JEOL JSM-6610LV scanning electron microscope at KBSI (Korea Basic Science Institute). High-precision data on U and Th contents and Th/U ratios of zircon obtained using a SHRIMP IIe and a LA-MC-ICPMS housed at KBSI.

A long experience, modern instrumentation, and techniques have provided the “zircon community” means to image and interpret preserved textures, and to decipher the history and evolution of rock. The zircon internal texture images are categorized according to their inferred genetic context.

The behavior of U and Th in magmatic zircon can be used as a geochemical indicator to determine the origins and crystallization environments of magmatic zircon. Increasing magma temperature should promote higher Th contents relative to U contents, resulting in higher Th/U ratios for zircon in mafic to intermediate rocks than in granitic rocks.

Th/U values in zircon are commonly used to discriminate between metamorphic (Th/U < 0.1) and magmatic (Th/U > 0.1) origin for zircon overgrowths. We test this hypothesis in the rocks from some areas of Mongolia.

Higher temperature, more-fractionated, short-duration, bimodal magmatism in extensional magmatic systems may produce highly variable and elevated zircon Th/U. In compressional magmatic systems, lower temperature, long-lived, granitoid, oxidizing melts are more conducive to low Th/U zircon crystallization. To test the utility of this correlation, we evaluated Th/U ratios in our samples. Most of them have the low Th/U ratios between 0.1–1.0 that corresponds to overall compressional phases (i.e., terrane accretion and orogenesis).

**Key words:** Zircon internal texture, Th/U ratios, Mongolia

\*corresponding author email address: soyungerel@num.edu.mn Tel.: +979-89160830

---

## 1. Оршил

Энэхүү ажилд бид өөрсдийн SHRIMP  $^{206}\text{Pb}$  ба LA-MC-ICPMS багажуудаар чулуулгийн үнэмлэхүй нас тодорхойлох шинжилгээ хийсэн 70 орчим чулуулгийн дээжийн 2000 орчим Th/U-ны харьцааны үр дүнг Монгол орны болон дэлхийн судлаачдын хэвлүүлсэн үр дүнгүүдтэй харьцуулан танилцуулж байна.

Циркон U ба Th агуулдаг геологийн үйл явцад хамгийн өргөн хэрэглэгддэг хронометр юм. Циркон аксессуар эрдэс байдлаар чулуулагт байх ба нэгэнт үүссэн бол дараагийн геологийн үйл явцуудыг даван туулах хандлагатай байдаг.

Геохронологийн үр дүнг тодорхойлохдоо хэмжиж гаргасан цирконуудын Th/U-ийн харьцааг тайлбарлах нь ихээхэн давуу талтай. Цирконы мөхлөгүүдийн Th/U-ны харьцааг тэдгээрийн өсөлтийн болон геологийн үйл явцуудыг ялгахад туслах арга болгон ашиглаж ирсэн. Жишээлбэл, метаморф ба магмын цирконуудыг ялгах гэх мэт (Williams and Claesson, 1987).

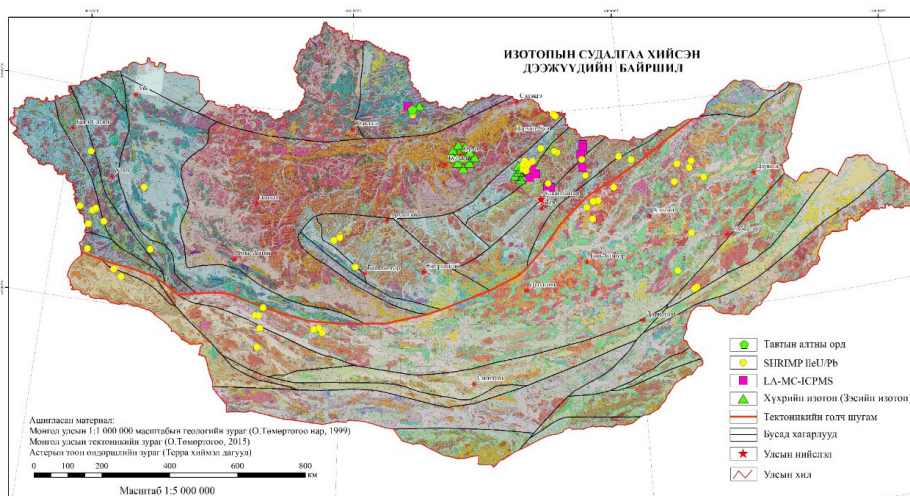
Уран сарнимал агуулгаар оршдог хамгийн их тархсан эрдсийн нэг бол циркон бөгөөд циркон нь өөрчлөлтөнд хамгийн тэсвэртэй эрдсийн нэг юм. Өгөршлөөр чулуулгаас суларсан циркон нь хожим тунамал чулуулагт хүнд хэмхдэст эрдсийн мөхлөг нь болж хадгалагдан уг чулуулаг нь метаморфизмд орсон ч цирконы мөхлөгийн цөм нь түүнд автахгүй хэвээр хоцорно.

Үр дүнд нь цирконы олон талст нь уг талстын түүхийн мэдэгдэхүйц хэсгийг хадгалж хоцорсон найрлагын нийлмэл бүсчлэлтэй байдгийг цирконы мөхлөгийн дотоод бүтцийн катодолюминесценцийн зураг болох CL зураг дээр илүү тод сайн харж изотопын шинжилгээний орчин үеийн орон зайн өндөр-ялгарлын (~5  $\mu\text{m}$ ) аргаар абсолют насыг цирконы талст доторх бие даасан салангид бүсүүдээр нь тодорхойлох боломжтой.

## 2. Судалгааны талбай

Монгол улс нь газарзүйн хувьд Хойд, Төв, Зүүн Азийн заагийн нутаг дэвсгэрт байрлах бөгөөд неопротерозойгоос өмнөх эртний талст суурийн ба хожуу протерозойн эхнээс хойш аккрец-коллизын явцад хэлбэржсэн Төв Азийн Ороген бүслүүрийн хэмжээнд байрласан нутаг дэвсгэр юм (Şengür, 1993) (зураг 1). Энэхүү судалгаанд МУИС-ийн өндөр түвшний судалгааны төслүүд, гадаадтай хамтарсан төслүүд, дотоодын судлаачид болон байгууллагуудын захиалгаар хийж өгсөн судалгааны ажлуудын үр дүнгүүдийг хамруулсан болно.

Изотопын судалгаанд зориулж авсан эдгээр дээжнүүд нь Монгол орны зарим талбайнуудад тухайлбал: Зэдийн бүс дэх (Эгийн голын) Тавтын алтны ордын талбай, Хойд Хэнтийн алтны бүсийн Зуунмодны хүдрийн дүүрэг болон бусад талбайнуудад тархсан магмын болон тунамал чулуулгууд дээр хийгдсэн (зураг 1).



Зураг 1. Изотопын судалгаа хийсэн дээжүүдийн байршил

### 3. Судалгааны аргачлал ба дээж бэлтгэл

Сонгосон дээжүүдэд петрографийн судалгааг хийж, дээжүүдийг хацар бутлагч болон цагирган бутлагчаар бутлан, циркон дээжийг ялгах стандарт зааврын дагуу боловсруулан, 70-220μм хоорондох хэмжээтэй циркон эрдсүүдийг МУИС-ийн Геологийн Суурь Судалгааны лабораторид “SMZ161TL тринокуляр” стереомикроскопыг ашиглан ялган авсан. Циркон LA-MC-ICPMS болон SHRIMP IIe U–Pb–ны үнэмлэхүй насны тодорхойлолтонд зориулж магмын чулуулгийн цирконы 100 гаруй, харин тунамал чулуулгийн детритал цирконы насны судалгаанд зориулж 300 гаруй мөхлөгүүдийг чулуулгийн дээж тус бүрээс ялган авч стандарт дээжүүдийн хамт FC1 (1099Ma, Pacs and Miller, 1993) цавуунд бариулан, өнгөлгөө хийж, үнэмлэхүй нас тодорхойлох судалгаануудыг хийсэн.

Цирконы мөхлөгийн дотоод бүтцийн катодоллюминесценцийн зураг (CL) болон эргэж-сарнисан электронуудын (BEC) зургуудыг “JEOL JSM-6610LV Scanning Electron” микроскопыг ашиглан авсан бөгөөд эдгээр зургуудын тусламжтайгаар судалгаа хийх талбайнуудыг сонгосон. SHRIMP IIe U–Pb–ны үнэмлэхүй насны хэмжилт дууссаны дараа (LA-MC-ICPMS-ээр хэмжснийг оруулахгүйгээр) хэмжилт хийсэн цирконы мөхлөг бүрийн өндөр нарийвчлалтай катодоллюминесценцийн зураг (CL) болон эргэж-сарнисан электронуудын (BEC) зургуудыг дахин авч тэмдэглэгээ хийсэн.

### 4. Үр дүн

#### 4.1. Цирконы дотоод бүтцийн судалгаа

Цирконуудын дотоод бүтцийн судалгааг 70 орчим чулуулгийн дээжинд судалгаа хийх явцад авсан

CL зургууд дээр хийлээ. Эдгээр дээжүүдийн CL зургуудад дараахи онцлог байдлууд харагддаг.

Дээжүүдийн CL зургаас харахад бүслүүрлэг бүтэц нарийхан байгаа нь хүчиллэг найрлагатай чулуулагт үүссэн циркон болохыг заана (зураг 2а). Бусад дээжүүдийн бүслүүрлэг бүтэц өргөндүү байгаа нь дундлагаас суурилаг найрлагатай магмын чулуулагт үүссэн циркон болохыг заана (зураг 2б). Энэ нь петрографийн судалгаагаар батлагдах ба харьцуулж хэлэхэд плагиоклазын изоморф эрдсүүдийн полисинтетик ихэрлэлтийн зураасны өргөн, нарийнтай холбон тайлбарлаж болно. Өөрөөр хэлбэл хүчиллэг найрлагатай плагиоклаз болох тусмаа полисинтетик ихэрлэлтийн зураас нарийсч, суурилаг болох тусмаа полисинтетик ихэрлэлтийн зураас өргөн болдог зүй тогтолтой ижил юм.

Мөн сектор бүслүүржилт энэ дээжний хавсралт зураг 2в-д цирконы CL зурагт тод ажиглагдаж байгаа. Энэ нь магмын интрузив болон эффузив чулуулагт гол төлөв тохиолддог(зураг 2в). Watson болон Liang (1995) зэрэг эрдэмтэд талстын ургалтын хурднаас хамаардаг ба аажим ургалттай талстууд болох интрузив чулуулгийн цирконд мөн метаморф цирконд тохиолддог гэж үздэг ба бидний судалгаа хийсэн дээжүүдэд маш ховор тааралдсан.

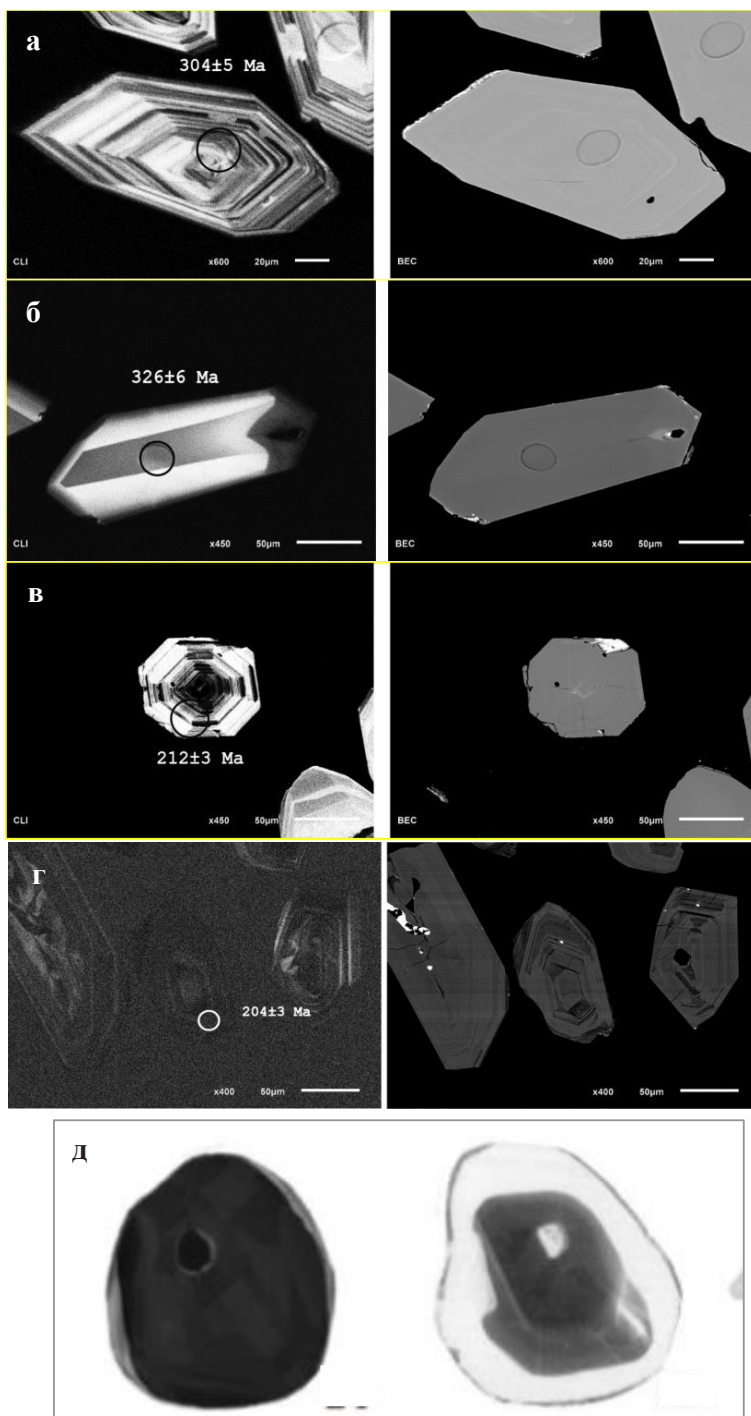
Зарим дээжүүдийн хувьд CL зураг нь ерөнхийдөө бараан байсан (зураг 2г). Бараан байгаа шалтгаан нь катаклазад болон өгөршилд нэлээд өртсөнөөс болж 3+ валенттай зарим ГХЭ-үүд  $Dy^{3+}$  (Mariano 1978, 1989; Remond et al.

1992, Hanchar and Rudnick 1995),  $Sm^{3+}$ ,  $Eu^{2+}$ ,  $Tb^{3+}$  (Ohnenstetter et al. 1991, Yang et al. 1992) сарнисантай холбоотой. Мөн U-ны өндөр агуулгатай байдагтай холбоотой.

Хэдийгээр цирконы бүтэц өгөршлийн циклийн үеэр химийн задралд маш тэсвэртэй байдаг ч энэ нь голдуу метамикт төлөвөөр байдаг. Энэ байдал түүний бүтцэд бага хэмжээгээр байдаг U, Th-ын цөмийн/цацраг идэвхт задралаар үүссэн өөрийгөө-төөнөсөн явцаас болсон дотоод бүтцийн гэмтлийг заана. Бүтцийн энэхүү үргэлжилсэн задралын төгсгөлийн үр дүнд нягт нь 16% орчмоор багассан, хугарлын анхны индекс буурсан изотроп шил бий болдог ба тус зургийг дээжинд шаардлага хангасан нарийвчлал сайтай зураг байхгүйн улмаас цирконы тухай өгүүллэгээс авсан болно (Fernando et al., 2003) (зураг 2д).

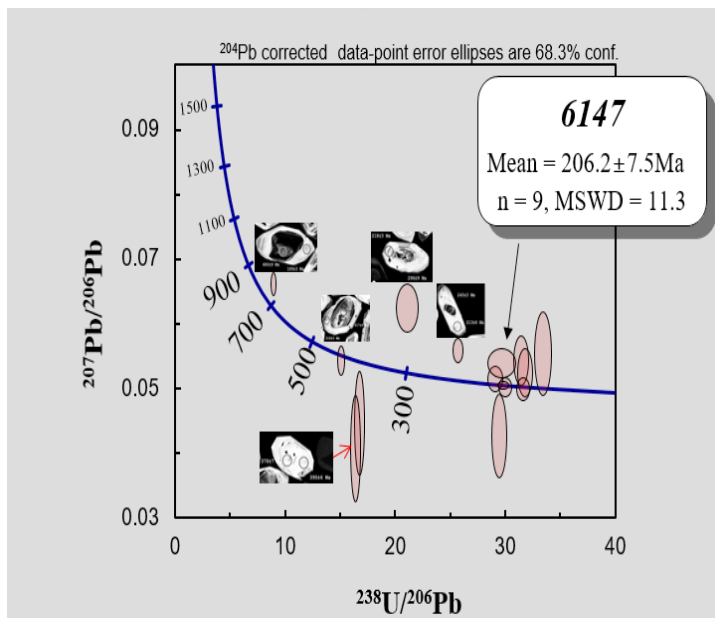
Судалгаахийх явцадуламжлагдсан цирконууд нэлээд тохиолдож байсан. Уламжлагдсан циркон агуулсан эсэхийг ялгаж танихад заримдаа бага зэргийн хүндрэлтэй боловч цөм хэсэг нь хүрээ хэсгээсээ ялгаатай харагдаж байсан (зураг 3):

1. Цөм хэсгийн талст нь хүрээ хэсгээсээ геометрийн хувьд зөв бус байрлалтай, кристаллографийн чиглэл нь өөр чиглэлд зөрсөн
2. Мөлгөржсөн
3. Цөм хэсэг нь огтлогдсон юм шиг
4. Бүслүүржилт үүсгээгүй, эсвэл эмх замбараагүй цөмтэй байна.



Зураг 2. Цирконы CL болон BEC зургууд

Уламжлагдсан циркон байгаа хэмжилтийг хийж тодорхойлсон эсэхийг BSE–CL зургуудаас нь харж, (Зураг 3).



Зураг 3. Конкордант диаграмм CL зургийн хамт

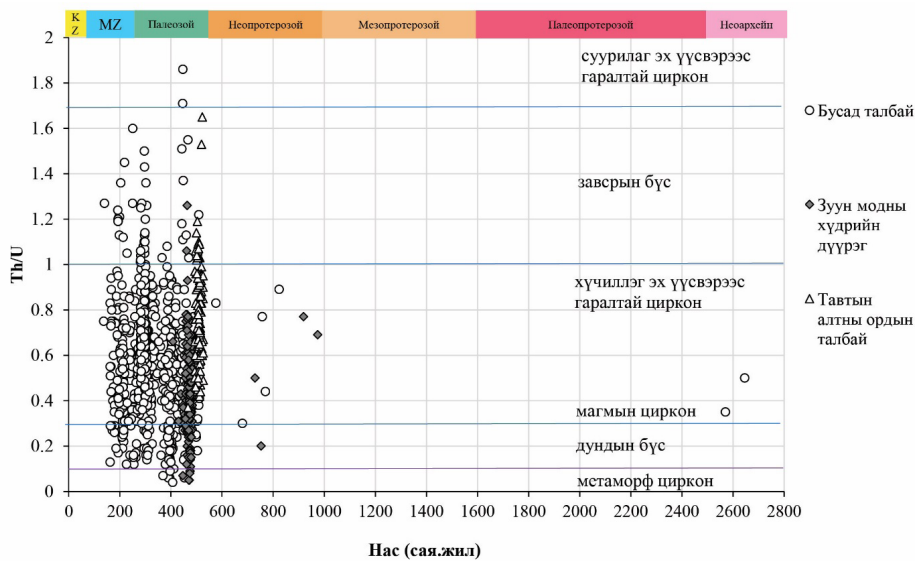
#### 4.2. Цирконы Th/U-ны харьцаа

U ба Th агуулгийг U-Pb-ны насыг тодорхойлох үед цуглуулдаг ба энэ харьцаа нь циркон эрдэс дэх геологийн үйл явцуудыг ойлгоход өмнө ашиглагдаж байгаагүй баялаг мэдээллээр хангана.

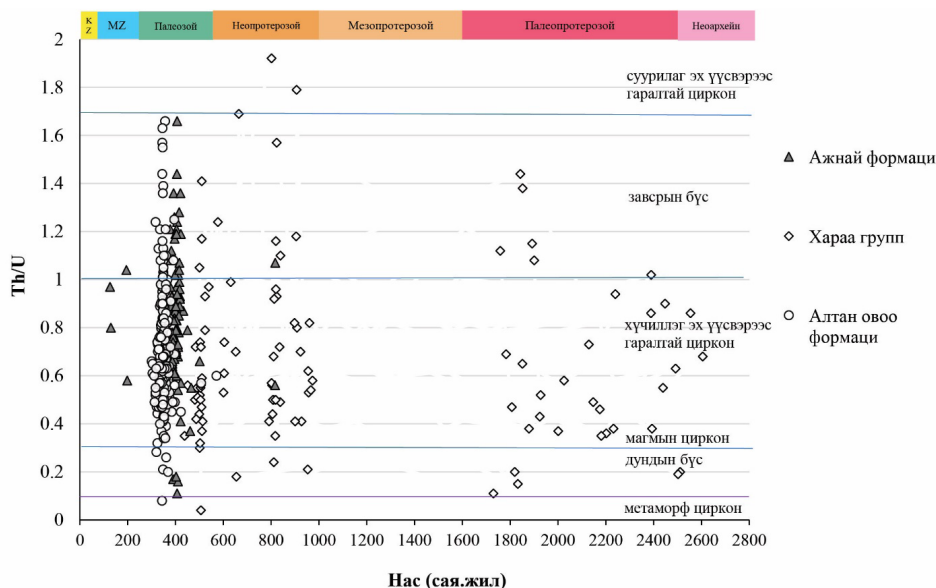
Бидний насны судалгаа хийсэн магмын чулуулгийн 60 гаруй дээжийн үр дүнд гарган авсан 1020 гаруй цирконы Th/U-ны харьцаа ба насны үр дүнг харуулсан зураг 4-өөс харахад ихэнхи харьцаа 0.1-1.0-ийн хооронд байгаа нь хүчиллэг эх үүсвэрээс гаралтай циркон болохыг зааж байна. Энэ нь цирконы дотоод бүтцийн болон петрографийн судалгаагаар батлагдаж байгаа юм.

Th/U-ны харьцаа >1-ээс дээш 1.7 хүртэл байгаа нь завсрын буюу дундлаг найрлагатай магмын чулуулаг байгааг зааж байна гэж үзсэн. Үүнийг Тавтын алтны ордын талбай (Oyungerel et al., 2018) болон Зуумодны хүдрийн дүүрэгт (Алтанзул нар., 2018) хийгдсэн петрографийн болон цирконы дотоод бүтцийн судалгаагаар нь дундлаг найрлагатай чулуулгууд болохыг баталж байгаа юм (Зураг 4). Цирконы Th/U-ны харьцаа 1.7-ээс их үед суурилаг найрлагатай гэж үзэж болно.

Судалгаанаас харахад Th/U харьцаа бага байдаг (<0.10) метаморф цирконыг зааж байгаа цөөн хэдэн өгөгдлийг зураг 4 болон зураг 5-аас харж болно (Kirkland et al. (2015).



Зураг 4. Магмын чулуулгуудын цирконы Th/U-ны харьцаа ба насны үр дүнгийн харьцуулсан диаграмм

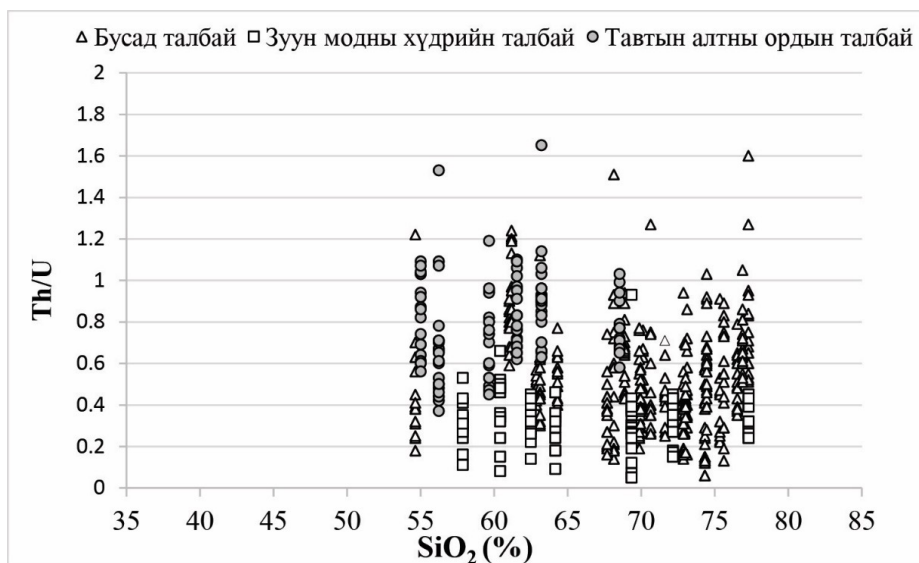


Зураг 5. Тунамал чулуулгуудын детритал цирконы Th/U-ны харьцаа ба насны үр дүнгийн харьцуулсан диаграмм

Тунамал чулуулагт ялангуяа Заг-Хараагийн террейнд байрладаг Зуун модны дүүрэгт тархсан кембри-түрүү ордовикын Хараа групп, дунд-дээд девоны Ажнай формаци (Жаргал нар., 2018) болон Асралт хайрхан, Улаанбаатарын террейнүүдэд тархсан Алтан-Овоо формацийн тунамал чулуулгуудын нийт 8 дээжинд LA-MC-ICPMS багажаар детритал цирконы насны судалгаа хийж, нийт 800 гаруй детритал цирконы Th/U-ны харьцаа ба насны үр дүнг харуулсан зураг 5-аас харахад ихэнхи нь 0.1-1.0-ийн хооронд байгаа хүчиллэг эх үүсвэрээс гаралтай циркон болохыг зааж байна. Үлдсэн нь дундлаг найрлагатай магмын чулуулгаас эх үүсвэртэй байж болох нь харагдаж байна. Жаргал нарын (2018) судалгаагаар Ажнай формацийн элсэнчулуу нь аркозын, Хараа группын элсэн чулуу нь субаркозоос аркозын

найрлагатай, мөн Оюунгэрэл нарын (2017) нарын судалгаагаар Алтан-Овоо формацийн элсэн чулуунуудыг литик-аркозын найрлагатай гэж тогтоосон нь бидний детритал цирконы Th/U-ны харьцааны үр дүнтэй тохирч байна. Иймээс эдгээр детритал цирконы Th/U-ны харьцааны өгөгдлүүдэд түшиглэн тунамал чулуулгийн эх үүсвэр чулуулгуудын найрлага, талсжилтын онцлогийн талаар чухал мэдээллийг авах боломжтой юм.

Мөн бид гол ислийн петрохимийн шинжилгээ хийгдсэн 40 гаруй магмын чулуулгуудын цирконы Th/U харьцаа ба SiO<sub>2</sub>-ийн харьцуулсан диаграммыг хийж үзэхэд SiO<sub>2</sub>-ийн агуулга буурахад цирконы Th/U-ны агуулга ихэсдэг байдал ажиглагдаж байгаа ба үүнийг петрографийн болон дотоод бүтцийн судалгаануудаар давхар батлан харуулж болно (зураг 6).



Зураг 6. Магмын чулуулгуудын цирконы Th/U харьцаа ба SiO<sub>2</sub>-ийн харьцуулсан диаграмм



Түүнчлэн бид магмын чулуулгуудын цирконы Th/U-ны харьцааг ашиглан магмын орчин нөхцөлд тохирсон тектоник орчны хамаарлыг судалж байна. Тухайлбал: цирконы Th/U-ны харьцаа 0.1-1.0-ийн хооронд байвал шахалтын буюу субдукцийн бүсэд үүссэн болохыг заана. Харин Th/U-ны харьцаа 1.0-3.5-ийн хооронд байвал тэлэлтийн буюу дивергент бүсэд үүссэн магматизм хэмээн тайлбарлаж болох юм.

## 5. Хэлэлцүүлэг

Ахин талсжилтанд автаагүй магмын цирконы Th/U-ны харьцаа 0.1-ээс дээш, метаморфизмийн явцад үүссэн цирконуудын хувьд тус харьцаа 0.1-ээс бага байдаг (Kirkland et al., 2015; Hanchar and Hoskin, 2003; Rubatto, 2002; Gatewood and Stowell, 2012).

Цирконы Th/U-ны харьцааг ялгах явцдаа хүчиллэг ба суурилаг найрлагатай чулуулгуудын хоорондох дундлаг найрлагатайг буюу завсрын гарал үүсэлтэйг ялгахад хүндрэлтэй (Kirkland et al., 2015).

Өндөр температурын (700- >1000°), илүү ялгарсан, илүү анхдагч суурилаг хайлмаг бүхий тэлэлтийн магматизм нь их агуулгатай Th/U-ыг бий болгож (Kirkland et al., 2015), бага температурын (500-800°), урт хугацаанд ялгарсан, цахиурын баян (боржингийн) хайлмагаас үүссэн шахалтын магмын систем нь бага агуулга бүхий Th/U-тай цирконыг үүсгэнэ. Үүнээс үзэхэд Монгол орон Төв Азийн Ороген Бүслүүрт байх учир чулуулгуудад хийгдсэн

насны судалгааны Th/U-ны агуулга дийлэнхидээ 0.1–1.0 зааж байгааг энэ судалгааны үр дүнгүүд болон бусад эрдэмтдийн хийж хэвлүүлсэн насны судалгааны үр дүнгүүдээс харж болно (Matthew et al., 2018).

Өөрөөр хэлбэл Th/U-ны харьцаа <1-ээс бага байгаа нь арлан нумтай холбоотой шахалтын тектоник стрессийн горимд бий болсон магмын иж бүрдлийг илэрхийлнэ. Ялангуяа Тавтын алтны ордын талбайд хийгдсэн насны судалгааны үр дүнгүүд батална (Oyungerel et al., 2018). Протерозой-Фанерозойн насны Хойд Америкийн детритал цирконы Th/U-ны харьцааны өндөр агуулгаар тэлэлтийн магматизм, бага агуулга нь конвергент орогенезийг зааж байгааг тодорхойлсон (Matthew et al., 2018).

Эцэст нь бид магмын цирконы үр дүнг ашиглан чулуулгийн найрлагыг тодорхойлох, тектоник үйл явцуудыг тайлбарлахаас гадна тунамал цирконы насны үр дүнгийн хамт гарган авч буй Th/U-ны харьцаа болон дотоод бүтцийн судалгаан дээр үндэслэн тунамал чулуугийн эх үүсвэр чулуулгийн найрлагыг тогтоох, тектоник процессуудыг тайлбарлах боломжтой юм. Ингэхдээ эдгээр бүх чулуулгуудын петрографийн болон геохимийн үр дүнгүүдтэй хамт харьцуулан судлах нь илүү нарийвчлал сайтай болно.

## 6. Дүгнэлт

Сүүлийн үеийн өндөр түвшний “SHRIMP Pe, LA-MC-ICPMS” багажуудаар циркон эрдэс дээр

чулуулгийн үнэмлэхүй насыг тодорхойлон U/Th-ийн харьцааны мэдээллийг гарган авснаар:

- Магмын чулуулгийн найрлагыг тодорхойлох
- Магмын болон метаморф цирконуудыг ялгах
- Детритал цирконы эх үүсвэр чулуулгийн найрлагыг тогтоох
- Гарал үүслийн геодинамик нөхцлийг нарийвчлан тодорхойлох
- Геологийн үйл явцуудыг тайлбарлах гэх мэт

олон үнэт мэдээллүүдийг гарган авч петрографи, геохимийн зэрэг олон талын судалгааны үр дүнгүүдтэй харьцуулан олон талаас нь батлах боломжтой юм.

## Талархал

Монгол Улсын Их Сургуулийн Геологийн Суурь Судалгааны Лабораторийн хамт олон, шавь нартаа, мөн Өмнөд Солонгос улсын Сөүлийн Үндэсний Их Сургуулийн Ашигт малтмалын лабораторийн хамт олонд болон Солонгосын Суурь Шинжлэх Хүрээлэнгийн Геохронологийн судалгааны багийнханд “SHRIMP Pe, LA-MC-ICPMS” багажуудаар циркон эрдэс дээр насны судалгаа хийхэд хамтран ажиллаж, зөвлөгөө, туслалцаа үзүүлсэнд талархлаа илэрхийлье. Түүнчлэн судалгааны дээж материалаа өгч судалгаа хийлгүүлэн, хамтран ажилласан геологийн мэргэжлийн байгууллага, компанийн хамт олонд талархлаа илэрхийлье.

## Ашигласан хэвлэл

- Алтанзул Ч., Оюунгэрэл С., Жаргал Л., Insung Lee., Kim Yeongmin., Хасмарал Т., 2018. “Бороо-Зуунмодны дүүрэгт тархсан магмын чулуулгийн үнэмлэхүй насны судалгаа”. “Хайгуулчин” сэтгүүл №59” Round Up 2018 хурлын 10 жилийн ойн тусгай дугаар, 211-232 хуудас
- Жаргал Л., Алтанзул Ч., Оюунгэрэл С., Insung Lee., Kim Yeongmin., 2018. “Хараагийн террейн дэх Зуунмодны дүүрэгт тархсан элсэнчулууны хэмхдэсийн модаль шинжилгээний үр дүн”. “Хайгуулчин” сэтгүүл №59” Round Up 2018 хурлын 10 жилийн ойн тусгай дугаар, 190-199
- Burnham A.D., Berry A.J., 2012. An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as a function of oxygen fugacity. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 95, 196–212.
- Cassel E.J., Grove M., Graham S.A., 2012. Eocene drainage evolution and erosion of the Sierra Nevada batholith across northern California and Nevada. *American Journal of Science* 312 (2), 117–144.
- Fernando Corfu., John M. Hancher., Paul W.O., Peter Kinny., 2003. Atlas of Zircon Textures. In: Hancher JM, Hoskin PWO. editors *Zircon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. New York: American Mineralogy Society 53, 469-500.
- Folk R.L., 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, Austin, Texas.
- Gatewood M.P., Stowell H.H., 2012. Linking zircon U-Pb and garnet Sm-Nd ages to date loading and metamorphism in the lower crust of a Cretaceous magmatic arc, Swakana Gneiss, WA, USA. *Lithos* 146–147, 128–142.
- Hoskin P.W.O., Schaltegger U., 2003. The composition of Zircon and Igneous and Metamorphic petrogenesis. In: Hancher JM, Hoskin PWO. editors *Zircon: Reviews in Mineralogy and*

- Geochemistry. New York: American Mineralogy Society 53, 27-62.
- Kirkland C.L., Smithies R.H., Taylor R.J.M., Evans N., McDonald B., 2015. Zircon Th/U ratios in magmatic environs. *Lithos* 212–215, 397–414.
- Mariano A.N., 1978. The application of cathodoluminescence for carbonatite exploration and characterization. Proc Intl Symp Carbonatites. Brasil Depart Nac Prod Mineral, Brasilia, 39-57.
- Mariano A.N., 1989. Cathodoluminescence emission spectra of rare earth element activators in minerals. *Rev Mineral* 21:339-348.
- Matthew P., McKay William T., Jackson Jr., Angela M. Hessler., 2018. Tectonic stress regime recorded by zircon Th/U. *Gondwana Research, GR Focus Review*.
- Ohnenstetter D., Cesbron F., Remond G., Caruba R., Claude J-M., 1991. Émissions de cathodoluminescence de deux populations de zircons naturels: tentative d'interprétation. *C R Acad Sci Paris* 313:641-647.
- Oyungerel S., Erdenesonor N., Insung Lee., Jargal L., Maibayar O., 2017. Annual Fall Joint Geology Meeting of the Geological Society of Korea “Petrographic and LA-MC-ICPMS detrital zircon U-Pb age dating studies of the Altan-Ovoo formation sandstones from the Khangai-Khentii basin of Mongolia. October 24-27.
- Oyungerel S., Insung Lee., Jargal L., Tegshbayar B., Maibayar O., 2018. “SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Dhzida intrusive rocks in the Tavit ore field, northern Mongolia”. “Geological Issues of Mongolia and Adjacent Regions GIMAR-II-2018” ISSN 2313-8408, Journal for “GIMAR-2018” Geological international conference 446 (14)”, 104-110.
- Paces J.B., Miller J.D., 1993. Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, Northeastern Minnesota: Geochronological insights to physical, petrogenic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1Ga midcontinent rift system. *J. Geophysical Research-Solid Earth* 98, 13997-14013.
- Şengür A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S., 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature* volume 364, pages 299–307.
- Tomurtogoo O., 2014. Tectonic framework of Mongolia. In: Petrov OV, Leonov YG, Pospelov II (eds) *Tectonic of Northern, Central and Eastern Asia. Explanatory Note to the Tectonic map of Northern-Central-Eastern Asia*.
- Remond G., Cesbron F., Chapoulie R., Ohnenstetter D., Roques-Carnes C., Schoverer M., 1992. Cathodoluminescence applied to the microcharacterization of mineral materials: A present status in experimentation and interpretation. *Scan Microsc* 6:23-68.
- Rubatto D., 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology* 184:123–138. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00355-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00355-2).
- Rudnick R.L., Williams I.S., 1987. Dating the lower crust by ion microprobe. *Earth Planet Sci Lett* 85:145-161.
- Watson .B., Liang Y., 1995. A simple model for sector zoning in slowly grown crystals: Implications for growth rate and lattice diffusion, with emphasis on accessory minerals in crustal rocks. *Am Mineral* 80:1179-1187.
- Yang B., Luff B.J., Townsend P.D., 1992. Cathodoluminescence of natural zircons. *J Phys: Condens Matter* 4:56175624.
- Williams I.S. , Claesson S., 1987. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, October 1987, Volume 97, Issue 2, pp 205–217.