

# НҮҮРС, НҮҮРСНИЙ ҮНС, ТӨМРИЙН ХУДРИЙН ХАЯГДАЛ ЗЭРЭГ ХОЁРДОГЧ ЭХ ҮҮСВЭРЭЭС ГАЗРЫН ХОВОР ЭЛЕМЕНТ ГАРГАН АВАХ БОЛОМЖИЙН СУДАЛГАА

Улаанбаатар  
2023



**Нүүрс, нүүрсний үнс, төмрийн хүдрийн  
хаягдал зэрэг хоёрдогч эх үүсвэрээс  
газрын ховор элемент гарган авах  
боломжийн судалгаа**

Улаанбаатар  
2023

**Төслийн зохицуулагч,  
зөвлөх:** Л.Алтангэрэл (МГТИС)  
Н.Сандагдорж (Эрдэнэс Монгол ХХК, ГХЭ-  
ийн судалгааны нэгж)  
А.Хаумдас (Эрдэнэс Монгол ХХК, ГХЭ-ийн  
судалгааны нэгж)

---

**Гүйцэтгэгч оюутнуудын  
баг:** В.Анхбаяр  
Б.Азжаргал  
Б.Батбаяр  
Б.Батчимэг  
Б.Бямбахорол  
Б.Жавхлан  
Б.Мичидмаа  
Ө.Нарангэрэл  
Ц.Оюун-Эрдэнэ  
Г.Түвшин  
Т.Тэмүүжин

---

**Хянан засварласан:** Л.Алтангэрэл  
Б.Батцэнгэл

---

**Талархал:** МГТИС-ийн “Байгалийн нөөц, Технологи”-  
ийн судалгааны магистрын хөтөлбөрийн  
чухал бүрэлдэхүүн хэсэг болох энэхүү  
төслийн хичээлийг хэрэгжүүлэхэддэмжкиж,  
хамтран ажилласан “Эрдэнэс Монгол” ХХК-  
ийн Газрын Ховор Элементийн Судалгааны  
Нэгж, Уул Уурхай, ХүндҮйлдвэрийн Яам  
болон дээж авахад дэмжин ажилласан  
компаниудад талархлаа илэрхийлье.

# Агуулга

	<b>Хураангуй</b>	<b>10</b>
	<b>Ерөнхий танилцуулга</b>	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>Оршил</b>	<b>12</b>
1.1	Газрын ховор элемент	12
1.2	Газрын ховор элементийн хэрэглээ	13
1.3	Дэлхийн газрын ховор элементийн нөөц ба орд	15
1.4	Газрын ховор элементийн геологи, ашигт малтмал	16
1.5	Монгол орны газрын ховор элементийн судалгаа, тойм мэдээлэл	17
1.6	Хоёрдогч эх үүсвэрийн газрын ховор элемент	18
1.7	Хоёрдогч эх үүсвэрээс газрын ховор элементийг физикийн аргаар гарган авах арга	22
1.8	Хоёрдогч эх үүсвэрээс газрын ховор элементийг химийн аргаар гарган авах арга	25
1.9	Хоёрдогч эх үүсвэрээс газрын ховор элементийг гарган авах ерөнхий схем	26
1.10	Хоёрдогч эх үүсвэрээс газрын ховор элементийг бактерийн уураг дээр сууринсан сорбент ашиглан гарган авах арга	27
1.11	Төмрийн худартэй холбоотой эх үүсвэрээс газрын ховор элементийг гарган авах арга	28
1.12	Нүүрсний үнснээс газрын ховор элемент гарган авах арга	31

<b>2</b>	<b>Судалгааны арга зүй</b>	<b>34</b>
2.1	Судалгааны үр дүн	35
2.2	Нүүрс болон нүүрсний үнсэн дэх газрын ховор элементийн агуулга	38
2.3	Төмрийн хүдэр болон баяжуулалтаас гарсан бүтээгдэхүүн дэх газрын ховор элементийн агуулга	43
<b>3</b>	<b>Газрын ховор элементийн зах зээлийн өнөөгийн нөхцөл байдал</b>	<b>46</b>
3.1	Газрын ховор элементийн үйлдвэрлэл	46
3.2	Газрын ховор элементийн зах зээл	48
<b>4</b>	<b>Газрын ховор элементийг гарган авахад байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөлөл</b>	<b>49</b>
4.1	Байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөөлөл	49
4.2	Байгаль орчинд үзүүлэх бусад нөлөөлөл	51
<b>5</b>	<b>Дүгнэлт</b>	<b>52</b>
	<b>Ашигласан ном зүй</b>	<b>54</b>

# Товчилсон үг

ГХЭ - Газрын ховор элемэнт  
УХУ – Уурхайн хүчиллэг уусмал

## Хүснэгтийн жагсаалт

Хүснэгт 1. Төслийн үе шат	11
Хүснэгт 2. Газрын ховор элементийн физик, химийн шинж чанарын харьцуулалт	13
Хүснэгт 3. Газрын ховор элементийн хэрэглээ	14
Хүснэгт 4. Уурхайн олборлолт 2020 онд ба дэлхийн царцdas дахь тархац	15
Хүснэгт 5. Төмрийн хаягдал болон апатитын хүдрээс газрын ховор элементийг гаргаж авах арга, үр дүн	28
Хүснэгт 6. Дэгдэмхий үнсний дээжинд хийсэн туршилтуудын үр дүн	31
Хүснэгт 7. Дэгдэмхий үнсний дээжинд хийсэн туршилтуудын үр дүн	32
Хүснэгт 8. Дээж цуглуулсан компаниудын ерөнхий мэдээлэл	34
Хүснэгт 9. Бүх дээжний газрын ховор элементийн нийлбэр агуулга	35
Хүснэгт 10. 2015-2021 он хүртэлх газрын ховор ислийн сонгогдсон дундаж үнэ (ам.доллар/кг)	48
Хүснэгт 11. Нүүрсний үнснээс газрын ховор элемент гарган авах урьдчилан боловсруулах технологийн үе шатууд	50

# Зургийн жагсаалт

Зураг 1.	Судалгааны төслийн явц, эргэх холбоо	11
Зураг 2.	Химийн үелэх систем болон газрын ховор элемент	12
Зураг 3.	Дэлхийн газрын ховор элементийн олборлолт, тархац	16
Зураг 4.	Монгол улсын газрын ховор элементийн ордууд 2022	18
Зураг 5.	Жижиг хэсгүүд дэх газрын ховор элементийн агуулгатай гарцын нийт агуулга, тархалт ба массын гарц	23
Зураг 6	Ялгаатай соронзон фракц дахь газрын ховор элементийн агуулгатай гарцын нийт агууламж, тархалт, массын гарц	23
Зураг 7.	Нүүрсний үнснээс газрын ховор элементийг гарган авах ерөнхий схем	26
Зураг 8.	Уурхайн хүчиллэг уусмалаас газрын ховор элементийг гарган авах ерөнхий схем	26
Зураг 9.	Төмрийн хүдрийн хаягдаас газрын ховор элементийг гарган авах схем	26
Зураг 10.	Газрын ховор элементийн бага агуулгатай уусмалаас газрын ховор элементийг ялгах арга	27
Зураг 11.	Төмрийн хүдэр, хаягдал, баяжмалаас	30
Зураг 12.	Дэгдэмхий үнснээс газрын ховор элементийг гарган авах боломжит процесийн схемүүд	33
Зураг 13.	Дээж цуглуванс ордын байршлыг газрын зураг дээр тэмдэглэсэн зураглал	35
Зураг 14.	Газрын ховор элементийн агуулга өндөртэй дээжийн харьцуулалт	37

Зураг 15.	Багануурын нүүрсний уурхайн дээж дэх газрын ховор элементийн тархалт	38
Зураг 16.	Шивээ Овоогийн нүүрсний уурхайн дээж дэх газрын ховор элементийн тархалт	39
Зураг 17.	Шарын голын нүүрсний уурхайн дээж дэх газрын ховор элементийн тархалт	39
Зураг 18.	Бор Хулан нүүрсний уурхайн дээж дэх газрын ховор элементийн тархалт	40
Зураг 19.	Адуунчлууны нүүрсний уурхайн дээж дэх газрын ховор элементийн тархалт	40
Зураг 20.	Энержи ресурс нүүрсний баяжуулах үйлдвэрийн дээж дэх газрын ховор элементийн тархалт	41
Зураг 21.	Дулааны цахилгаан станц 4-ийн үнсний дээж дэх газрын ховор элементийн тархалт	41
Зураг 22.	Дорнодын Дулааны цахилгаан станцын үнсний дээж дэх газрын ховор элементийн тархалт	42
Зураг 23.	Төмөртэй төмрийн хүдрийн баяжуулах үйлдвэрийн дээж дэх газрын ховор элементийн тархалт	43
Зураг 24.	Баргилтын төмрийн хүдрийн баяжуулах үйлдвэрийн дээж дэх газрын ховор элементийн тархалт	44
Зураг 25.	Элстэй төмрийн хүдрийн уурхайн дээж дэх газрын ховор элементийн тархалт	45
Зураг 26.	Исэлдсэн газрын ховор элементийн дэлхийн хэмжээний үйлдвэрлэл	47
Зураг 27.	Дэлхийн газрын ховор элементийн металын зах зээл	48
Зураг 28.	ДЦС-4 нүүрсний үнс, нүүрсний овоолгын байдал	50

## Хураангуй

Монгол-Германы хамтарсан ашигт малтмал технологийн их сургуулийн "Байгалийн нөөц, технологи"-ийн магистрын хөтөлбөрийн оюутнууд "Ахисан түвшний судалгааны төсөл" хичээлийн хүрээнд "Эрдэнэс Монгол" ХХК-ийн Газрын Ховор Элементийн Судалгааны нэгжтэй хамтран энэхүү судалгааг хийсэн. Сүүлийн үеийн дэвшилтэт технологид газрын ховор элемент өргөн хэрэглэгдэх болсноор дэлхий нийтээр түүний эрэлт хэрэгцээ улам өсөн нэмэгдэж байна. Үүнтэй холбоотойгоор газрын ховор элементийг хоёрдогч эх үүсвэрээс гарган авах боломжийг тодорхойлоход судлаачид анхаарлаа хандуулах болсон. Манай улсын хэмжээнд энэ чиглэлээр ямар боломж, хэрэгцээ байгааг судлах шаардлагатай холбоотойгоор энэхүү судалгааг Монголд анх удаа хийсэн. Судалгааны гол зорилго нь газрын

ховор элементийн хоёрдогч эх үүсвэр болох нүүрсний уурхайн хаягдал, төмрийн хүдрийн уурхайн хаягдал болон дулааны цахилгаан станцын үнснээс дээж авч газрын ховор элементийн агуулгыг тодорхойлох юм. Судалгаанд ашиглах зорилгоор Монгол улсад уул уурхайн чиглэлээр үйл ажиллагаа явуулдаг нүүрсний 6, төмрийн хүдрийн 3 уурхайгаас болон 2 дулааны цахилгаан станцын үнснээс нийт 43 дээжийг авсан. Цуглуулсан дээжүүдэд химийн шинжилгээ хийн, газрын ховор элементийн агуулгыг тодорхойлсон. Шинжилгээний үр дүнгээс үзэхэд нүүрс болон нүүрсний бүтээгдэхүүнд Ce, La, Nd, болон Y, төмрийн хүдрийн ордын анхдагч хүдэр болон бүтээгдэхүүнд Ce, La, Nd, Sc, болон Y, дулааны цахилгаан станцын үнсэнд Ce, Gd, La, Nd, Y зэрэг газрын ховор элементийн агуулга өндөр байгааг тодорхойлсон.

---

**Түлхүүр үр** - Газрын ховор элемент, флотаци, соронзон фракц, дэгдэмхий үнс, хүчил болон шүлтийн уусгалт, шатаах, ион хандлалт

# Ерөнхий танилцуулга

Ахисан түвшний судалгааны төслийн хичээл нь бэлтгэл судалгаа болон хэрэгжүүлэх үе шатуудаас бүрдэж, нийт 23 долоо хоногийн хугацаанд үргэлжилсэн.

Хүснэгт 1.-т төслийн үе шатуудыг үзүүлэв. Бэлтгэл судалгааны үе шатанд 2 багт хуваагдан, багийн гишүүн бүр долоо хоногоор тодорхой сэдвийн хүрээнд хайлт хийж, судалгааны өгүүлэл судалсан.

Багийн бусад гишүүдтэйгээ харилцан мэдээлэл солилцох зорилгоор гишүүд долоо хоног бүр өөрийн уншсан судалгааны ажлын тэмдэглэлийг маягтаар хөтөлж холбогдох дүгнэлтийг гаргаж ажилласан.

Долоо хоног бүр тавьсан зорилтын хүрээнд судалсан өгүүллийн жагсаал-

тыг гаргаж, гол үр дүнгийн хураангуйг бичих даалгавартай ажилласан.

Монгол орны нөхцөл байдлыг харгалзан эх үүсвэрийг магадлах болон дээжийн олдоц өндөр нүүрс болон нүүрсний дайвар бүтээгдэхүүн, төмрийн хоёрдогч эх үүсвэрүүдэд гол анхаарлаа хандуулсан. Бэлтгэл судалгааны шатны дараа 2 баг нэгдэж, хамтран судалгааг үргэлжлүүлэн хийсэн.

Бэлтгэл судалгааны шатанд гарган авсан үр дунд үндэслэн хэд хэдэн эх үүсвэрээс дээж авч, цуглуулсан дээжид элементийн шинжилгээ хийн, ГХЭ-ийг тодорхойлсон. Төслийн сүүлийн 5 долоо хоногт багийн бүх гишүүд өөрсдийн хийсэн судалгаа, даалгавраа нэгтгэж, тайлан бичсэн.

Хүснэгт 1. Төслийн үе шат

Багууд тут тийшидэг шатын 1/2 ижил										Багууд худалдааны шатын 1/2 ижил												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Зорилт тодорхойлжүүлэх шатын тийшидэгийн шатын 1/2 ижил	Үргэлжлэх / Хөгжлийн тодорхойлжүүлэх шатын 1/2 ижил	Ажлын тодорхойлжүүлэх шатын 1/2 ижил	Тодорхойлжүүлэх шатын 1/2 ижил	Дээжийн боловч тодорхойлжүүлэх шатын 1/2 ижил	Чадлыг тодорхойлжүүлэх шатын 1/2 ижил																	
Хөгжлийн тодорхойлжүүлэх шатын 1/2 ижил	Үргэлжлэх / Хөгжлийн тодорхойлжүүлэх шатын 1/2 ижил	Ажлын тодорхойлжүүлэх шатын 1/2 ижил	Тодорхойлжүүлэх шатын 1/2 ижил	Дээжийн боловч тодорхойлжүүлэх шатын 1/2 ижил	Чадлыг тодорхойлжүүлэх шатын 1/2 ижил																	



Зураг 1. Судалгааны төслийн явц, эргэх холбоо

# 1

## Оршил

### 1.1 Газрын ховор элемент

Газрын ховор элемент (ГХЭ) нь үелэх системийн арван долоон метал элементээс бүрддэг. Эдгээр элементүүд нь химийн үелэх систем дэх арван таван лантаноид

элементүүд болон физик, химийн шинжээрээ төстэй сканди, иттри зэрэг элементүүд багтдаг (Зураг 2) [1].

ГХЭ-ийн нягт  $4.48\text{g/cm}^3$ - $9.33\text{g/cm}^3$ , хайлах температур  $804^\circ\text{C}$ - $1550^\circ\text{C}$  байдаг.

The periodic table highlights the lanthanide (Lanthanides) and actinide (Actinides) series. The lanthanides are highlighted in blue in the 6th period, and the actinides are highlighted in blue in the 7th period. The table is divided into sections: HEAVY Rare Earth Elements and LIGHT Rare Earth Elements. The lanthanides include La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. The actinides include Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr.

Зураг 2. Химийн үелэх систем болон газрын ховор элемент [1]

**Хүснэгт 2.** ГХЭ-ийн физик, химийн шинж чанарын харьцуулалт [2]

Элемент	Химийн тэмдэг	Атомын дугаар	Атомын масс	Няйт g/cm <sup>3</sup>	Хайлах °C	Викерсийн хатуулаг	Өнгө	Исэлдэхүйн хэм	Дулаан багтаамж ж/(моль·К)
Лантан	La	57	138.9	6.146	918	37	өнгөгүй	3	26.2
Цери	Ce	58	140.1	8.16	798	24	өнгөгүй	3 болон 4	27.0
Прозеодим	Pr	59	140.9	6.773	931	37	шар ногоон	3 болон 4	27.0
Неодим	Nd	60	144.2	7.008	1021	35	улаан ягаан	3	27.5
Промети	Pm	61	145	7.264	1042	-	ягаан	3	24.3
Самари	Sm	62	150.3	7.52	1074	45	шар	2 болон 3	29.6
Европи	Eu	63	151.9	5.244	822	17	өнгөгүй	2 болон 3	27.7
Гадолини	Gd	64	157.2	7.901	1313	57	өнгөгүй	3	37.1
Терби	Tb	65	158.9	8.23	1356	46	Цайвар ягаан	3 болон 4	28.9
Диспрози	Dy	66	162.5	8.551	1412	42	Цайвар шар ногоон	3	28.2
Гольми	Ho	67	164.9	8.795	1474	42	шар	3	27.2
Эрби	Er	68	167.2	9.066	1529	44	ягаан	3	28.1
Тули	Tm	69	168.9	9.321	1545	48	цайвар ягаан	2 болон 3	27.0
Иттерби	Yb	70	173	6.966	819	21	өнгөгүй	2 болон 3	26.7
Летеци	Lu	71	174.9	9.841	1663	77	өнгөгүй	3	26.9
Иттерби	Yb	39	88.9	4.469	1522	38	-	3	25.5
Сканди	Sc	21	44.9	2.989	1541	85	-	3	26.5

## 1.2 Газрын ховор элементийн хэрэглээ

ГХЭ-ийн хэрэглээ, эрэлт хэрэгцээ жил ирэх тусам өсөх хандлагатай байна. Дэлхий нийтээр ихэнх ГХЭ-ийг катализатор болон соронзонд ашигладаг. АНУ-д ГХЭ-ийг илүүтэй катализаторын зориулалтаар ашигладаг бөгөөд керамик, шил, өнгөлгөөний

гол хэрэглээ болж байна.

ГХЭ-ийн бусад чухал хэрэглээ нь өндөр хүчин чадалтай соронз, хайлш, шил, электроникийн үйлдвэрлэлд хамаарна. Се болон La нь катализаторын хувьд чухал бөгөөд газрын тос боловсруулах

болон дизель түлшний нэмэлт болгон ашигладаг. Nd нь уламжлалт болон нүүрстөрөгч багатай технологид соронз үйлдвэрлэхэд чухал ач холбогдолтой. Энэ ангилалд хамаарах ГХЭ-ийг хайбрид болон цахилгаан тээврийн хэрэгслийн цахилгаан мотор, салхин үүсгүүрийн генератор, хатуу диск, зөөврийн электрон төхөөрөмж, микрофон, чангаг яригч зэрэгт ашигладаг.

Ce, La, Nd нь хайлш үйлдвэрлэх, түлшний холимог болон никель-металл гидрид батерей үйлдвэрлэхэд чухал ач холбогдолтой. Ce, Ga, Nd нь электроникийн салбарт хэрэгцээтэй бөгөөд LCD болон плазмын дэлгэц, шилэн кабель, лазер үйлдвэрлэл, түүнчлэн эмнэлгийн төхөөрөмжинд ашиглагддаг. ГХЭ-ийн бусад хэрэглээнд бордоо, ус цэвэршүүлэх зэрэг багтана (Хүснэгт 3).

**Хүснэгт 3.** Газрын ховор элементийн хэрэглээ [3]

Элемент	Нийтлэг хэрэглээ	Элементийн бүлэг
Лантан	Лантан ислийн нэмэлт нь оптик линз дэх гэрлийн хугарлын нэмэгдүүлдэг, катализатор нь түүхий нефтийн боловсруулалт, гэрэлтуулгийн фосфор, батерей, металл хайлш, ёнгёлгөөний нэгдэл, керамикт	Хөнгөн газрын ховор элемент
Цери	Оптик линз, гэрэлтуулгийн фосфорын ёнгёлгөөний нэгдэл, зайд, металл, керамик, шилэн нэмэлт	
Прозеодми	Өндөр хүчин чадалтай байнгын соронз, батарей, металл хайлш, катализатор, ёнгёлгөөний нэгдэл, шилэн нэмэлт, керамик,	
Неодим	Катализатор нь хүнд түүхий газрын тосны шинэчлэл, өндөр хүчин чадалтай байнгын соронз, неодим-иттри-хөнгөн цагаан анар лазер, неодим төмөр-борын байнгын соронз, батарей, металл хайлш, керамик, шилэн нэмэлт	
Самари	Самари-кобальт байнгын соронз, батарей	
Европи	Өнгөт телевизийн холой дахь улаан өнгөний фосфор идэвхжүүлэгч	Хүнд газрын ховор элементүүд
Гадолини	Өндөр хүчин чадалт тогтмол соронз, нейтрон цацрагийн эсрэг будаг эсвэл бүрэх, фосфор	
Терби	Тэрбиум төмөр-диспрозиумтой никель хайлш (Тэрфенол-Д)	
Диспрози	Өндөр хүчин чадалтай байнгын соронз, керамик, нано технологийн судалгаа	
Гольми	Өндөр хүчин чадалтай байнгын соронз, цөмийн хяналтын саваа, лазер, оптик бүрээс	
Эрби	Шилэн лазер өсгөгч, металл хайлш	Хосолмолов шинжтэй
Тули	ГХЭ-тэй төстэй шинж чанаруудтай.	
Итербиум	Зөөврийн рентген төхөөрөмж, стресс хэмжигч, лазер, металл хайлш, катализатор дахь цацрагийн эх үүсвэр	
Летеци	Цөөн хэрэглээтэй	
Иттерби	Өндөр хүчин чадалтай хөнгөн металлургийн хэрэглээ	
Сканди	Лазер төхөөрөмж	

## 1.3 Дэлхийн газрын ховор элементийн нөөц ба орд

ГХЭ-ийн ордуудын ихэнх нь Хятад, Вьетнамд байдаг бөгөөд Бразил, Орос, Энэтхэг, Малайз, Өмнөд Африк байгалийн нөөцөөрөө удаална (Хүснэгт 4). Хятад улс ГХЭ-ийн үйлдвэрлэлээр тэргүүлж, дараа нь Америк, Мьянмар, Австрали, Энэтхэг, Малайз, Орос, Тайланд зэрэг улс ордог. Хятад хамгийн том нөөцтэй ба дэлхийн газрын ховор элементийн 38%, харин Вьетнам 19%, Бразил 18%, Орос 10%, Энэтхэгт 6% оршино. Бусад улс орнууд тэр дундаа Австрали,

Канад, Өмнөд Африк, Шри Ланка, Тайланд зэрэг орнуудад үлдсэн багахан ГХЭ-ийн нөөц агуулагдаж байна. 2008 онд Хятад улс дэлхийн ГХЭ-ийн үйлдвэрлэлийн 90 гаруй хувийг, 2011 оноос хойш 97 хувийг үйлдвэрлэж байна. 2014 оноос эхлэн БНХАУ-ын Засгийн газраас ГХЭ-ийн экспортод хязгаарлалт хийсэн нь дэлхийн зах зээл дээр газрын ховор элементийн хомсдол үүсгэн эрэлт нэмэгдэхэд нөлөөлсөн [4].

**Хүснэгт 4.** Уурхайн олборлолт 2020 онд ба дэлхийн царцdas дахь тархац

Дэлхийн царцdas				Үйлдвэрлэл 2020		
№	Улс	Нөөц/тонн/жилд	Нөөц/хувь/жмлд	Улс	тонн/жил	хувь/жил
1	БНХАУ	44,000,000	37.99%	БНХАУ	140,000.00	57.54%
2	Вьетнам	22,000,000	18.99%	АНУ	38,000.00	15.62%
3	Бразил	21,000,000	18.13%	Мьянмар	30,000.00	12.33%
4	Орос	12,000,000	10.36%	Австрали	17,000.00	6.99%
5	Энэтхэг	6,900,000	5.96%	Мадагаскар	8,000.00	3.29%
6	Австрали	4,100,000	3.54%	Энэтхэг	3,000.00	1.23%
7	АНУ	1,500,000	1.30%	Орос	2,700.00	1.11%
8	Гренланд	1,500,000	1.30%	Тайланд	2,000.00	0.82%
9	Танзани	890,000	0.77%	Вьетнам	1,000.00	0.41%
10	Канада	830,000	0.72%	Бразил	1,000.00	0.41%
11	Өмнөд Африк	790,000	0.68%	Бурунди	500.00	0.21%
12	Бусад	310,000	0.27%	Бусад	100.00	0.04%
	Нийт	115,820,000	100.00%	Нийт	243,300.00	100.00%

Дэлхийн царцдаст ГХЭ нь зэстэй адил түгээмэл байдаг. Жишээлбэл, Церийг авч үзвэл нэг саяд 68 (ppm) байдаг хамгийн элбэг тааралдаг элемент юм [5]. Геохимийн шинж чанараараа газрын ховор элемент таруу тархацтай. Иймээс олборлолт хийхэд хангалттай зузаан кластер үүсгээгүй учраас орд болж чаддаггүй. Үүгээрээ энэ ашигт малтмалыг газрын ховор элемент гэж нэрлэдэг [6]. Дэлхийн ГХЭ-ийн олборлолт, тархацыг доорх зурагт харуулав (Зураг 3).



Зураг 3. Дэлхийн ГХЭ-ийн олборлолт, тархац

## 1.4 Газрын ховор элементийн геологи, ашигт малтмал

ГХЭ-ийн үүсэл гарлын талаар мэдэх нь хайгуул хийхэд ихээхэн тустай. Мөн эдийн засгийн хувьд ашигтай, ашиглах боломжтой концентрац ихтэй газрын ховор элемент ихэвчлэн талст чулуулагт байдаг. ГХЭ нь шүлтлэг магмын чулуулагт болон карбонатуудад хувирмал чулуулагт илүү түгээмэл байдаг. ГХЭ-ийн эрэлттэй элементүүд нь ихэвчлэн карбонат, исэл, фосфат, силикат дахь чулуулагт үүсгэгч

гурван валентын катион хэлбэрээр оршдог. Газрын ховор элемент нь химийн шинж чанарын хувьд торитой төстэй бөгөөд ихэвчлэн энэ төрлийн элементийн орд, ашигт малтмалаас олддог.

### Кембрийн өмнөх үе

Газрын ховор элементийн илрэлүүд нь пегматит, дэл судал, хагарал ба хагарлын бүс, металл карбонат чулуулаг, ерөнхийдөө

шүлтлэг магмын чулуулагт тархсан эрдэс минерал, тунамал чулуулаг зэрэгт оршино. Палео шороон ордын тунамал чулуулаг нь голчлон Кембрийн хавтгай толгойн элсэн чулуу, Цэрдийн галавын Меза-Вerde тогтцод, бага оврын ордуудад байдаг. Пермийн фосфорын тогтцын фосфатаар баялаг чулуулагт газрын ховор элементийн тархалт мэн бүртгэгдсэн. Гуравдагч үеийн хүдэр нь шүлтлэг магмын чулуулаг, карбонатит судал, далан, гидротермал бүс, элсэн чулуун доторх уусмалын шилжилтийн хуримтлал зэрэг орно.

Дөрөвдөгчийн газрын ховор элементийн хүдэр нь хунгарласан шороон болон эртний шороон ордуудаас олддог [5]. Олон тооны

ашигт малтмал нь газрын ховор элементийг нэн чухал бүрэлдэхүүн хэсэг болгон агуулахаас гадна мэн тооны ашигт малтмал нь газрын ховор элементийг нэмэлт элемент байдлаар агуулдаг. Эдгээр ашигт малтмалын цөөхөн нь ашигт малтмалын хүдэрт тооцогдох хангалттай их хэмжээний газрын ховор элементийг агуулдаг. Церийн чулуу ба монаosit нь олон төрлийн галт уулын чулуулгийн дотор харьцангуй түгээмэл нэмэлт эрдэс болдог. Дэлхий дахинд, арилжаалагдах боломжтой газрын ховор элементүүдийн гол эх үүсвэр нь бастнаезит, лопарит, монацит, ксенотит зэрэг ашигт малтмал, мэн газрын ховор ион шингээх чадвартай шавар зэрэг юм.

## 1.5 Монгол орны газрын ховор элементийн судалгаа, тойм мэдээлэл

Манай улсын нутаг дэвсгэрт газрын ховор элементийн геологийн цогц судалгаа хийгдээгүй ч Ханбогд, Халзанбүрэгтэй, Лугийн гол, Мушгия худаг, Хотгор, Ар гол зэрэг газрын ховор элементээр баялаг газрууд олдсон. Дөрвөн орд, түүнчлэн 71 илрэл, 260 орчим эрдэсжсэн газар илэрсэн. Одоо улсын төсөөв, хувийн хэвшлийн хөрөнгөөр Монголын нутаг дэвсгэрт орших Мушгия худаг, Хотгор,

Лугийн гол, Халзанбүрэгтэй зэрэг ордуудад газрын ховор элементийн хайгуул хийж, нийт гурван сая тонн ислийн нөөц илрүүлээд байна. Нөөц тогтоогдсон чодоог хүртэлнэгчордыг ашиглаагүй байна [8]. Газрын ховор элементүүдийн хэрэглээ орчин үеийн технологид ашиглах нь нэмэгдэж байгаагийн хэрээр тэдгээрийн эрэлт улам бүр өсөж байна.

Дэлхий даяар газрын ховор



Зураг 4. Монгол улсын ГХЭ-ийн ордууд 2022 [7]

элементийн хүдрийн нөөц шавхагдаж байгаа тул тэдгээрээс газрын ховор элементийг гаргаж авах шинэ орд, боловсруулах дэвшилтэт технологийн аргууд дэлхий нийтийн сонирхлыг татааж байна. Монгол орны.govийн бүсийн Мушгия худаг, Хотгор, Лугийн голын ордуудад хөнгөн газрын ховор элемент, харин Ховд аймгийн бүсийн Халzan бүрэгтэй, Улаан дэл, Шар

толгой зэрэг ордуудад хүнд газрын ховор элемент зонхилж байна. Газрын ховор элементийн бие даасан томоохон ашигт малтмалд карбонат төрлийн бастнаезит, фосфат төрлийн моназит, ксенотим орно. Гэтэл манай улсад бие даасан ашигт малтмалын орд, бусад ашигт малтмалын ашиглалт байхгүй байна.

## 1.6 Хоёрдогч эх үүсвэрийн газрын ховор элемент

Орчин үеийн технологийн нийгэмд газрын ховор элементийн хэрэглээ нэмэгдэж байгаа нь дэлхийн хэмжээнд түүний эрэлт хэрэгцээг мөн нэмэгдүүлж байна. Хятадын зах зээлд монополоор хяналт тавьж байгаа нь нийлүүлэлтийн хумигдмал байдал, байгаль орчны нөлөөллөөс үүдэн газрын ховор элементийн

уlamжлалт олборлолтод саад болж байгаа бөгөөд тэдгээрийн эрэлт хэрэгцээ байнга өсөн нэмэгдэж буй зэрэг шалтгааны улмаас хоёрдогч эх үүсвэрийг хайх судалгаа эрчимтэй явагдаж байна. Тухайлбал, уурхайн хүчиллэг ус, нүүрс, нүүрсний дайвар бүтээгдэхүүнүүд (үнс), төмрийн хүдрийн хаягдал, апатит, пиromе-

таллургийн шаар, баокситын үлдэгдэл (улаан шавар), фосфогипс, фосфатын дайвар бүтээгдэхүүн болон бусад хаягдуудаас (жишээлбэл, электроник, гэрэлтүүлэг) ГХЭ гарган авах судалгаа түлхүү хийгдэж байна. Түүнчлэн, бусад улс орнууд газрын ховор элементийн бусад нөөцийг хайж, илрүүлэн өөрсдийн газрын ховор элементийн салбарыг хөгжүүлэхдэд түлхэц үзүүлэхийг хичээж

байна.

Газрын ховор элементийг гаргаж авах аргад физик аргаас гадна гидрометаллургийн болон биогидрометаллургийн аргууд байдаг. Сайжруулсан нөхөн сэргээх зорилгоор газрын ховор элементийн олборлох арга техникийг ашиглах нь үндсэндээ эдгээр чухал элементүүдийн үйлдвэрлэлийн өвөрмөц хэрэглээтэй холбоотой юм [9,10].

## Нүүрсний үнс

Дэлхий даяар нийт нүүрсний үнсийг асар их хэмжээгээр үйлдвэрлэсээр байна. Нүүрсийг шатаах явцад нүүрстөрөгчийн давхар исэл болон бусад хийтэй хамт их хэмжээний үнс үүсдэг. Утааны хийтэй хамт дээш гарч буй нарийн ширхэгтэй хэсгийг дэгдэмхий үнс гэж үздэг бол дээш дэгддэггүй хүнд үнсийг ёроолын үнс гэж нэрлээд нийтэд нь нүүрсний үнс гэдэг. Нарийн ширхэгтэй үнсний тал хувийг барилгын материалд дахин ашигладаг. Үлдсэн хэсэг нь гол төлөв хогийн цэг болон даланд хадгалагддаг. Нүүрсний үнс нь Ge, U зэрэг чухал элементүүдийн зохицтой эх үүсвэр юм. Эдгээр үнснээс  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$  уусгалт, олон үе шаттай давирхайн уусгалт, цахилгаан диалитик аргаар газрын ховор элементийг гаргаж авах боломжтой эсэхийг судлахад, цахилгаан диалитик аргаар 70% хүртэлх гарцтай авах боломжтойг тогтоосон. Нүүрсний үнсэнд муллит ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), кальцит ( $CaCO_3$ ), кварц ( $SiO_2$ ), гематит ( $Fe_2O_3$ ) зэрэг эрдэс бодисууд илэрсэн байна.

Судалгаанаас үзэхэд газрын ховор элемент нь амархан гидролизод ордог тул ион хэлбэрээр нь гаргаж авдаг. Кертис, Юдович нарын судалснаар (2009) нүүрсний үнс нь дэлхийн хэмжээнд дунджаар 445 прт газрын ховор элемент агуулдаг гэж тооцоолжээ. Үнснээс газрын ховор элемент олборлох болон баяжуулах нь анхдагч түүхий эдээс олборлон боловсруулахаас эдийн засгийн хувьд бага зардлаар гүйцэтгэх боломжтой. Нэмж дурдахад, нүүрсний дэгдэмхий үнс нь олон төрлийн газрын ховор элементийг агуулдаг бол ихэнх уурхайд эдгээр элементүүдийн зөвхөн зарим төрлүүд л байдаг. Эдгээр шалтгааны улмаас олон компаниуд нүүрсний үнснээс газрын ховор элемент гаргаж авах аргыг судалж, нүүрсний үнс боловсруулах нь уламжлалт уул уурхайн эдийн засаг, байгаль орчинд ээлтэй хувилбар эсэхийг судалж байна [10].

## Уурхайн хүчиллэг уусмал

Уурхайн хүчиллэг уусмал (УХУ) нь өндөр хүчиллэг, сульфатын агууламж, хортой металлын агууламжтай тул хүрээлэн буй орчны бохирдлын ноцтой асуудал үүсгэдэг. УХУ нь асар их хэмжээний хог хаягдлыг бий болгож, улмаар үүнийг цэвэрлэх нь өндөр өртөгтэй тул уул уурхайн тогтвортой байдлын хамгийн том сорилтуудын нэг хэвээр байна. УХУ-ийг шийдвэрлэх хамгийн түгээмэл арга бол их хэмжээний лаг үүсгэдэг натрийн карбонат, шохойн чулуу, шохой, аммиак зэрэг шүлтлэг урвалжаар саармагжуулах явдал юм. Асуудлыг шийдвэрлэх одоогийн аргууд хангалттай үр дүнгүй бас өртөг өндөртэй байна. Тиймээс энэ нь эдийн засгийн болон тогтвортой шинэ техникийг хөгжүүлэх сэдэл болж, тэдгээрийг нөхөн сэргээх, хүсээгүй

үр дагавар, байгаль орчинд учруулсан хохирлыг арилгахад чиглэж байна. УХУ-оос газрын ховор элементийг ялгахын тулд эхний ээлжинд CaO, MgO эсвэл NaOH ашиглан газрын ховор элемент агуулсан УХУ-аас Fe-ийг зайлцуулах юм. Хоёр дахь шат нь газрын ховор элемент агуулсан Fe-гүй боловсруулсан УХУ-г сульфоны бүлэг агуулсан IX давирхайг ашиглан баяжуулж, тодорхой pH-тэй фосфатын давсыг ашиглан сонгомол тунадасжуулах үе шатаар газрын ховор элементийг фосфат болгон сэргээхэд ашиглах юм [11]. УХУ-аас газрын ховор элемент гаргаж авах нь газрын ховор элементийн өндөр гарцтай болон химиин бодисын хэрэглээ зэрэгт тустай боловч агуулгын хувьд бага байна.

## Төмрийн хүдэр, хаягдал

Төмрийн хүдрийн ордын төрөл болон үүсэх процессоос хамааран төмрийн хүдрийн ордын хаягдал дахь газрын ховор элементийн агууламж янз бүр байдаг. Хэрэв хөвүүлэн баяжуулах процесс ашигласан бол хаягдал дахь газрын ховор элементийн агууламж бага ойролцоогоор 20ppm ГХЭ-ийн нийлбэр нь хайлуулах болон соронзон баяжуулалт ашигласан тохиолдолд газрын ховор элемент агууламж өндөр байна (400ppm ГХЭ-ийн нийлбэр нь орчим

нь төмрийн хүдрийн агууламжтай ойролцоо байна). Голашигт малтмал нь бастназит, монацит, ксенотим, апатит, гадолинит, циркон юм. Ойролцоогоор газрын ховор элементийн 95% нь эхний гурван эрдэст байдаг. Төмрийн хаягдаас газрын ховор элементийг гаргаж авах нь эдийн засгийн хувьд боломжтой бөгөөд материалын хэрэгцээ, түүнчлэн стратегийн шинэ арга техникийг бий болгох боломжийг олгодог [12].

## Фосфатын дайвар бүтээгдэхүүн

Фосфатын хүчил, фосфатын хаягдал, фосфатын бордооны

дайвар бүтээгдэхүүн зэрэг хэд хэдэн фосфатын хоёрдогч эх үүсвэрт ГХЭ байгаа нь тогтоогдсон. Ийм эх үүсвэрээс найдвартай газрын ховор элемент үйлдвэрлэх боломжтой болохыг харуулж байна [13].

## Металлургийн шаар

Хаягдал цахилгаан ба электрон хог хаягдал хайлуулах процессын пиromеталлургийн шаарнаас газрын ховор элементийг гаргах металлургийн үйлдвэрийн схемийг хараахан боловсруулаагүй байна.

Газрын ховор элементүүд нь

хүчилтөрөгчтэй ижил шинж чанартай тул “зэс хайлуулах үйлдвэр”-ийн шааранд шингэрүүлсэн (исэлдсэн) хэлбэрээр бий болж хар тугалганы тэсэлгээний зуухны шааранд ордог [13].

## Бокситын үлдэгдэл (улаан шавар)

Боксит нь натрийн гидроксидын халуун уусмалд шингэдэг бодис юм. Энэ уусмалын уусаагүй хатуу хэсгүүд нь шүүгдэх замаар цэвэрлэгдэн бокситийн үлдэгдэл гэх улаан өнгөтэй шаврыг бүрдүүлдэг байна. Улаан шаврын эрдэслэг бүрэлдэхүүн нь бокситын төрөл, ордын байршил, болон тухайн ордын Байерын процессын параметрүүдээс хамаарна. Улаан шавар нь шинж чанараасаа хамаарч

байгаль орчин болон хүний эрүүл мэндэд их бага хэмжээгээр сөрөг нөлөө үзүүлдэг. Улаан шавраас ховор элемент, скандиум олборлох талаар олон тооны судалгаа байдаг. Үүнээс газрын ховор элемент гаргаж авах хоёр үндсэн арга байдаг. Нэг нь цэвэр гидрометаллургийн процесс эсвэл пиromеталлургийн болон гидрометаллургийн хосолмол гэсэн хоёр арга байдаг.

## 1.7 Хоёрдогч эх үүсвэрээс газрын ховор элементийг физикийн аргаар гарган авах арга

Одоогоор судлагдсан хоёрдогч эх үүсвэрт нүүрсний дэгдэмхий үнс, уурхайн ус зайлуулах суваг дахь хүчиллэг усмал, мөн төмрийн уурхайн хаягдал болох лаг орно. Хүдэр болон бусад бүхий л хоёрдогч эх үүсвэрүүд нь физик болон химийн шинж чанараараа хоорондоо ялгагддаг. Одоогоор хоёрдогч эх үүсвэрээс ГХЭ-ийг ялгах судалгаа Монголд судлагдаагүй байгаа хэдий ч баяжуулалтын аргууд, химийн болон физик процессуудыг ашиглан ГХЭ-ийг хоёрдогч эх үүсвэрээс ялган авах боломжтой. Химийн аргаар ялгахад усгалтнын болон ион солилцох аргууд түгээмэл ашигладаг бол физикийн аргаар ГХЭ-ийг шигших, соронзон шинж дээр үндэслэн ялгах, нягтын зөрүүг ашиглан ялгах, флотацийн аргаар баяжуулах зэргийг хэд хэдэн аргыг ашиглах боломжтой. Ямар хоёрдогч эх үүсвэрээс ГХЭ-ийг ялгахаас хамааран дээр дурдсан процессуудын аль боломжтойг сонгон ашиглана.

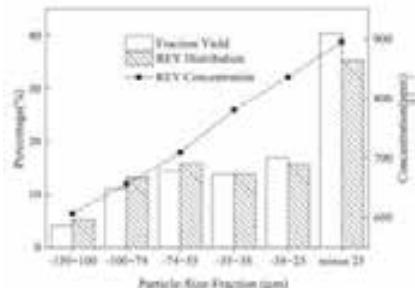
### Дэгдэмхий үнс:

Цахилгаан станцуудын хаягдал дайвар болох дэгдэмхий үнс нь ГХЭ-ийг ялган авах боломжтой хоёрдогч

эх үүсвэр юм. Дэлхий даяар ихэнх цахилгаан станцууд их хэмжээний үнс гаргаж дараа нь түүнийгээ хогийн цэгүүдэд булах эсвэл хуримтлуулдаг байна. Нүүрсний дэгдэмхий үнсэнд анхдагч нүүрстэй харьцуулахад илүү их хэмжээний ГХЭ-ийн агуулга байдаг нь шаталтын процессын явцад нүүрстөрөгч шатсантай холбоотой юм. Шаталтын процессын дараа үнсэн дэх ГХЭ-ийн концентраци 8-10 дахин нэмэгддэг байна [14]. Үүнээс дүгнэхэд дэгдэмхий үнс нь ГХЭ-ийн хоёрдогч эх үүсвэр болох бүрэн боломжтой юм. Хэдийгээр нүүрсний дэгдэмхий үнс нь ГХЭ-ийн агуулга ихтэй боловч түүнийг физикийн аргаар баяжуулан ялгах шаардлагатай. Нүүрсний үнсийг шигших, соронзон шинж дээр үндэслэн ялгах, нягтаар нь ялгах зэрэг аргуудыг ашиглан ГХЭ-ийг баяжуулах хэд хэдэн туршилтууд хийгдсэн байдаг.

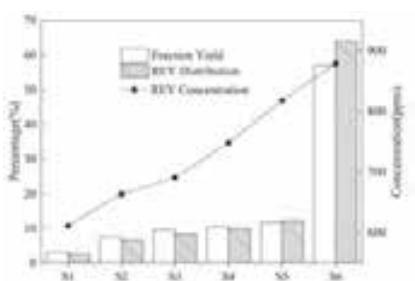
Шигших нь уул уурхайн олборлолтонд ихэвчлэн хэрэглэгддэг хамгийн түгээмэл физик арга юм. Зураг 6-д үзүүлсэн нүүрсний дэгдэмхий үнсэнд шигших арга ашиглан ГХЭ-ийн агуулгатай гарцыг баяжуулсны дараах шинжилгээний үр дүнг харуулав.

<sup>1</sup> Байерын процесс- Бокситыг идэмхий натри буюу натрийн гидроксидтой хольж даралтын дор халаах процесс



**Зураг 5.** Жижиг хэсгүүд дэх ГХЭ-ийн агуулгатай гарцын нийт агуулга, тархалт ба массын гарц [14]

Зураг 5-аас харахад жижиг хэсгийн хэмжээ багасах тусам ГХЭ агуулсан гарцын агуулга нь ойролцоогоор 600-аас 900 ppm хүртэл нэмэгдэж, -25 mm хэмжээ дээр ГХЭ-ийн гарц хамгийн өндөр агуулгатай байна. Туршилтын дараах ГХЭ-ийн агуулга нь нийт ГХЭ-ийн агуулгатай ижил байгааг мөн харж болно. Тиймээс өндөр ГХЭ-ийн агуулгатай гарцаас жижиг хэсгүүдийн хэмжээнд үндэслэн ГХЭ-ийг ялгах, баяжуулах боломжтой [14]. Соронзон ялгах аргыг ашиглан хоёрдогч эх үүсвэр болох нүүрсний үнс нурамнаас ГХЭ-ийн агуулгатай гарцыг гарган аваад мөн ашиглаж болно.



**Зураг 6.** Ялгаатай соронзон фракц дахь ГХЭ-ийн агуулгатай гарцын нийт агууламж, тархалт, массын гарц [14]

Зураг 6-д нүүрсний дэгдэмхий

үнсэнд соронзон ялгах арга ашиглан ГХЭ-ийн агуулгатай гарцыг баяжуулсны дараах туршилтын үр дүнг харуулав. Соронzon мэдрэх чадварыг S1-ээс S6 хүртэл бууруулсан болно.

Графикаас харахад ГХЭ-ийн концентраци ойролцоогоор 600-аас 900 ppm хүртэл нэмэгдсэн байна. Соронzon мэдрэмтгий чанар буурах тусам ГХЭ-ийн агууламж нэмэгдэж байгаа нь туршилтын үр дүнд харагдаж байна. Харин соронzon бус үлдэгдэл нь массын 57%-д, ГХЭ-ийн 64%-ийг бүрдүүлж байна. Мөн нэгэн чухал ажиглалт бол S1 фракц дахь төмрийн агууламж маш өндөр (бараг 60%) байна [14].

ГХЭ-ийг ялгах судалгаан дахь бас нэгэн асуудал нь төмрийн агуулга юм. Төмрийн агуулгатай эрдсээс ГХЭ-ийг ялган авахын өмнө төмрийг ялгаж авснаар хүчлийн зарцуулалт болон нийт боловсруулалтын зардлыг эрс багасгадаг болохыг тогтоожээ [15]. Өөр нэгэн физик арга бол нягтын зөрүүн дээр үндэслэн ялгах юм. Нягтын зөрүүн дээр ялгах аргын хувьд хамгийн нягт өндөртэй фракцид ГХЭ-ийн агуулга их байх боловч ГХЭ нь дунд зэргийн нягтралтай хэсгүүдэд илүү бат бөх, жигд тархсан байдаг. Тиймээс нягтын зөрүүн дээр ялгах арга нь шигших болон соронzon тусгаарлах аргууд шиг үр дүнтэй биш юм.

#### Төмрийн хүдрийн хаягдал:

Төмрийн хүдрийн хаягдал дээр соронzon шинжийг ашиглан ялгах арга болон флотацийн аргууд нэлээн судлагдсан байдаг. Соронzon шинж

чанарыг ашиглан ялгах аргын хувьд төмрийн хүдрийн хаягдлаас ГХЭ-ийг салгаж чаддаггүй. Учир нь соронзон орны хүчийг нэмэгдүүлэхэд ГХЭ-ээс гадна төмөр болон цахиурын агуулга давхар өсдөг байна. Үүнээс шалтгаалан дараа дараагийн процессуудад төмөр болон цахиур нь саад болдог байна. Соронзон шинж ашиглан ГХЭ-ийг салгах судалгааны дараа флотацийн аргыг судалсан байдаг. Хамгийн их үр дүнтэй нь "Илүү барзгар-цэвэрлэгч гидроксомик хүчлийн флотаци нь 1.16 баяжуулалтын харьцаагаар 80% ГХЭ-ийг барьж, 17% Fe, 62% Si-г ялгасан" байна [16].

#### **Уурхайн хүчиллэг уусмал:**

Уурхайн хүчиллэг уусмал дахь ГХЭ нь ион хэлбэрээр байдаг. Шингээгч ашиглах, ион солилцох арга, тунадасжуулах аргуудаар ГХЭ-ийг баяжуулах буюу ялган авах боломжтой. Эдгээр аргуудыг 1.8 Хоёрдогч эх үүсвэрээс газрын ховор элементийг химийн аргаар гаргаж авах дэд бүлэгт илүү дэлгэрэнгүй

тусгав.

ГХЭ-ийг уусгах, баяжуулах зэрэг химийн процессуудын өмнө физик аргыг ашиглах нь илүү үр дүнтэй. Нүүрсний дэгдэмхий үнсний хувьд үндсэн олборлолтын өмнөх концентрацийг нэмэгдүүлэхийн тулд шигших, соронзон ялгах аргыг хослуулан хэрэглэх нь ашигтай. Мөн цаашлаад нүүрсний үнс нь төмрийн хүдрийн хаягдал, уурхайн хүчиллэг уусмал болон лагтай харьцуулахад илүү боломжит хоёрдогч эх үүсвэр юм. Төмрийн хүдрийн хаягдалийн хувьд флотацийн аргаар баяжуулахаас өмнө нягтын зөрүү эсвэл соронзон шинж чанаараар нь ялгах аргыг ашиглан ГХЭ-ийн концентрацийг нэмэгдүүлэх нь хүндрэлтэй байдаг. Мөн төмрийн хүдрийн хаягдал нь цахиур, төмрийг их хэмжээгээр агуулдаг тул химийн урвалжийн ашиглалтын зардал өндөр, ГХЭ ялгах гол процесст үр дунгүй болоход нөлөөлдөг байна. Уурхайн хүчиллэг уусмалаас химийн аргаар ГХЭ-ийг баяжуулахтай холбоотой дэлгэрэнгүй мэдээллийг дараагийн дэд бүлэгт тайлбарлав.

## 1.8

# Хоёрдогч эх үүсвэрээс газрын ховор элементийг химийн аргаар гарган авах арга

ГХЭ-ийн бага агуулгатай эх үүсвэр жишээ нь нүүрсний дэгдэмхий үнсэнд ГХЭ-ээс гадна бусад металлууд агуулагдсан байдаг. Хоёрдогч түүхий эх үүсвэрээс ГХЭ-ийг ялгах түгээмэл химийн арга нь коагуляци, флокуляци, флотаци, ион солилцоо, сорбент ашиглах, цахилгаан химийн процессууд орно [17].

Байгаль дээрх эрдэс болон бусад хоёрдогч эх үүсвэрээс гидрометаллургийн аргыг ашиглан ГХЭ-ийг гарган авах нь хамгийн өргөн ашиглагддаг арга юм. Энэ нь уусгат болон гарган авах үе гэсэн 2 үе шаттай [18].

ГХЭ агуулсан эрдсээс ГХЭ-ийг гаргаж авахын тулд эрдсийг ион (усан уусмал) хэлбэрт шилжүүлэх шаардлагатай. Усгалтын процесс нь ГХЭ агуулсан чuluулаг, эрдсээс ГХЭ-ийг гарган авдаг химийн арга юм. Хамгийн түгээмэл эрдсүүдийг уусгахад ашигладаг зарим аргуудаас дурдвал:

### Өндөр концентрацтай хүхрийн хүчлээр уусгах:

Энэ аргыг 200-500°C температурт гүйцэтгэдэг. Энэхүү химийн урвалын дунд Хүхрийн хүчил нь хүхрийн оксид (хий) хэлбэрт шилжинэ.

### Давсны хүчлээр уусгах:

Энэ химийн урвал нь 850°C - 900°C-т 1 цагийн турш  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ба  $\text{HCl}$  жингийн 3:7 харьцаатайгаар ашиглан уусгах нь илүү оновчтой.

### Идэмхий натриар уусгах:

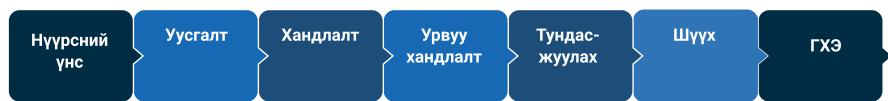
Идэмхий натриар уусгах нь 120-130°C-ийн температурт явагддаг [19]. Үүний дараа уусмал хэлбэрт буй ГХЭ-ийн ионыг янз бүрийн салгах процессашигланялганавна. Хоёрдогч эх үүсвэрээс мөн гидрометаллургийн аргын дунд үүссэн уусмалаас ГХЭ-ийг ялгахад дараах аргууд хэрэглэдэг байна. Үүнд:

- Тунадасжуулах
- Цахилгаан коагуляци
- Хөвүүлэн баяжуулах буюу флотац
- Сонгомол сорбентоор ялгах
- Ионы солилцоо болон шингээлт.

Ион солилцох аргын сүл тал нь процессын дараа их хэмжээний катионы ион болон комплекс нэгдэл агуулсан хүчиллэг болон шүлтлэг хаягдал уусмал үүсдэг байна.

## 1.9 Хоёрдогч эх үүсвэрээс газрын ховор элементийг гарган авах өрөнхий схем

Нүүрсний дэгдэмхий үнсийг өндөр концентрацтай хүчлээр уусгах, хандлалт ашиглах зэрэг нь урвуу хандлалтын процесс дахь химиин урвалжийн зардлыг хэмнэдэг.



Зураг 7. Нүүрсний үнснээс ГХЭ-ийг гарган авах өрөнхий схем

Уурхайн хүчиллэг уусмал нь ГХЭ-ийг гарган авах хоёрдогч эх үүсвэрт мөн хамаардаг.



Зураг 8. Уурхайн хүчиллэг уусмалаас ГХЭ-ийг гарган авах өрөнхий схем

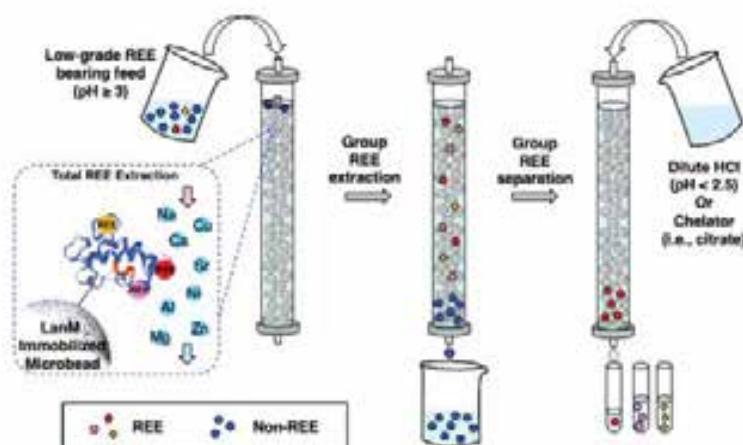
Төмрийн хүдрийн хаягдал дахь ГХЭ-ийн агуулга нүүрс болон нүүрсний үнсэн дэх агуулгатай харьцуулахад ГХЭ-ийн агуулга бага байдаг. Уусгалтын өмнө флотацийн аргаар төмрийн хүдрийн хаягдлыг баяжуулдаг байна.



Зураг 9. Төмрийн хүдрийн хаягдаас ГХЭ-ийг гарган авах схем

## 1.10

### Хоёрдогч эх үүсвэрээс ГХЭ-ийг бактерийн уураг дээр сууриссан сорбент ашиглан гарган авах арга



Зураг 10. ГХЭ-ийн бага агуулгатай уусмалаас ГХЭ-ийг ялгах арга

Ланмодулин (LanM) гэдэг уураг дээр сууриссан ГХЭ-ийг ялгаж авах шинэ шингээгч (сорбент) шинээр судлагдаж байна. ГХЭ агуулсан анхны уусмалаас ГХЭ-ийг сонгомолоор шингээж авсны дараагаар бусад металлуудыг адсорбцлон авна. Үүний дараа уусгагчийн нөхцлийг өөрчилснөөр газрын ховор элементүүдийг шингээгчээс нь тус тусад нь дэсорбцлоно. Жишээ нь уусмалын хүчиллэг орчныг өөрчилснөөр эсвэл хелатор нэмснээр газрын ховор элементийн батжилтын

тогтмол буурсан сорбентоос ялгаж авна. Анхны уусмал дахь газрын ховор элементийн хэмжээ маш бага агуулгатай байсан ч энэхүү шингээгч нь өндөр цэвэршилттэй ГХЭ-ийг амжилттай ялгаж авдаг байна [20].

Энэхүү аргыг цаашид илүү нарийн судлах шаардлагатай бөгөөд түүнийг ашиглан үйлдвэрийн нөхцөлд хамгийн өндөр цэвэршилттэй ГХЭ гарган авах хэмжээнд өргөжүүлэх боломжтой юм.

## 1.11 Төмрийн хүдэртэй холбоотой эх үүсвэрээс газрын ховор элементийг гарган авах арга

Төмөртэй холбоотой хоёрдогч эх үүсвэрээс ГХЭ-ийг гарган авах янз бүрийн аргууд байдаг. Эдгээр аргуудын олон төрлийн дээж дээр хийсэн янз бүрийн туршилтуудын үр дүнгийн талаар тойм гаргахын тулд энэхүү сэдвийн талаарх товч агуулга бүхий хэд хэдэн өгүүллийг сонгон судалсан. Үүний зэрэгцээ ижил төрлийн хоёрдогч эх сурвалж

дээр хийсэн туршилтын үр дүнгээс илүү ерөнхий ойлголт авахыг зорьж, эдгээр үр дүнгийн үнэлгээнд үндэслэн төслийн цаашдын ажилд тодорхой чиглэл өгөх боломжтой гэж үзсэн.

Төмрийн эрдэс боловсруулалт нь түүний хаягдал болон баяжмал дахь ГХЭ-ийн баяжилтанд хэрхэн нөлөөлж байгааг судлах нь чухал юм.

**Хүснэгт 5.** Төмрийн хаягдал болон апатитын хүдрээс ГХЭ-ийг гаргаж авах арга, үр дүн [8]

Материалын ангилал	Дээжний төрөл	Арга аргачлал	Нехцэл	Үр дүн
Төмрийн хаягдал	Төмрийн хүдрийн хаягдал	Соронзон – Хөвүүлэн баяжуулах	Цуглуулагч: натрийн олеат, натрийн цахиур дарагч	Баяжилтын харьцаа 1.6-1.8
	Төмрийн хаягдал (цахиураар баялаг)	Нэлсон болон чичиргээт ширээ		Ширхэглэлийн хэмжээ 74 микроноос бага үед агууллын өсөлт байгаагүй
	Төмрийн хүдрийн хаягдал	Хайлуулах	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , 700°C болон 2MHN <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	ГХЭ-ийн метал авалт сайн байсан
ГХЭ агуулсан хүдэр	ГХЭ агуулсан хүдэр	Хүндийн хүчиний болон соронзон ялгалт		Соронзон бус хоосон чулуулгийг амжилттай зailуулсан
Апатитын хүдэр	Апатитын соронзон хүдэр	Тунадасжуулах	Азотын хүчлийн уусгалтын трибутил фосфат	Уламжлалт хүчлээр уусгах боломжтой хувилбар
	Апатитын хүдэр	Хөвүүлэн баяжуулах	Натрийн олеат	Металл авалт 90%
	Апатитын хүдэр	Уусгалт	Азотын хүчил	Металл авалт болон гарц сайн
	Апатитын баяжмал	Хүчиллэгийн төвшин, уусгах хугацаа, хутгах хурд, температур, ширхэглэлийн хэмжээ	60% хүчиллэг, хатууний агуулга 30%, уусгах хугацаа 30мин, хутгах хурд 200 эрг/мин, температур 60%	Зарим ГХЭ-ийн металл авалт 59-74%

Төмрийн хүдрийн дээж болон хөвүүлэн баяжуулах, соронзон ялгах, хайлах зэрэг янз бүрийн процессоос гарах хаягдлыг цуглуулж, ГХЭ-ийн баяжилтыг үнэлэх зорилгоор судалсан. Үр дүнгээс үзэхэд хөвүүлэн баяжуулах явцад гарсан хаягдал нь ямар ч баяжилт явагдаагүй, харин эсрэгээрээ ГХЭ-ийн агууламж багассан байгаа ч соронзон ялгаралт болон хайлуулах процесс нь ГХЭ-ийн баяжилтанд илүү их зэрэг нөлөө үзүүлсэн байна. Энэ нь мөн урьдчилан баяжуулсан эх нь илүү ач холбогдолтойг харуулж байна [21].

Төмрийн хаягдлын дээж болон ГХЭ-ийн агууламж өндөртэй эрдсийн нэг болох апатитын хүдэр дээр хэд хэдэн судалгаа, боловсруулалтыг хийсэн. Үр дүнгийн хураангуйг Хүснэгт 5-д үзүүлэв.

Төмрийн хаягдлаас ГХЭ гарган авах аргуудаас тоймловол:

- Төрөл бүрийн ялгах аргуудаас хөвүүлэн баяжуулалт нь бусад аргуудтай харьцуулахад илүү сайн металл авалттай, агуулгын өсөлт сайтай үр дүн үзүүлсэн. Гол цуглуулагч ба дарагчаар натрийн олеат болон натрийн цахиур ашигласан.

- Хүндийн хүчний, соронзон болон цахилгаан статик аргууд нь ГХЭ-ийн ашигт малтмал агуулсан материалаас хоосон чуулгийг салгахад тусалдаг боловч гарц багатай байдаг.

- Төмрийн хүдэр эсвэл хаягдал болон апатитаас ГХЭ-ийг гаргаж авах гидрометаллургийн аргууд нь өөр өөр төрлийн хүчил ашигласан олон тохиолдолд үр дүнтэй байгаа

нь тогтоогдсон.

- Үр дүнг сайжруулахын тулд янз бүрийн аргуудын хослолыг ихэвчлэн ашигладаг.

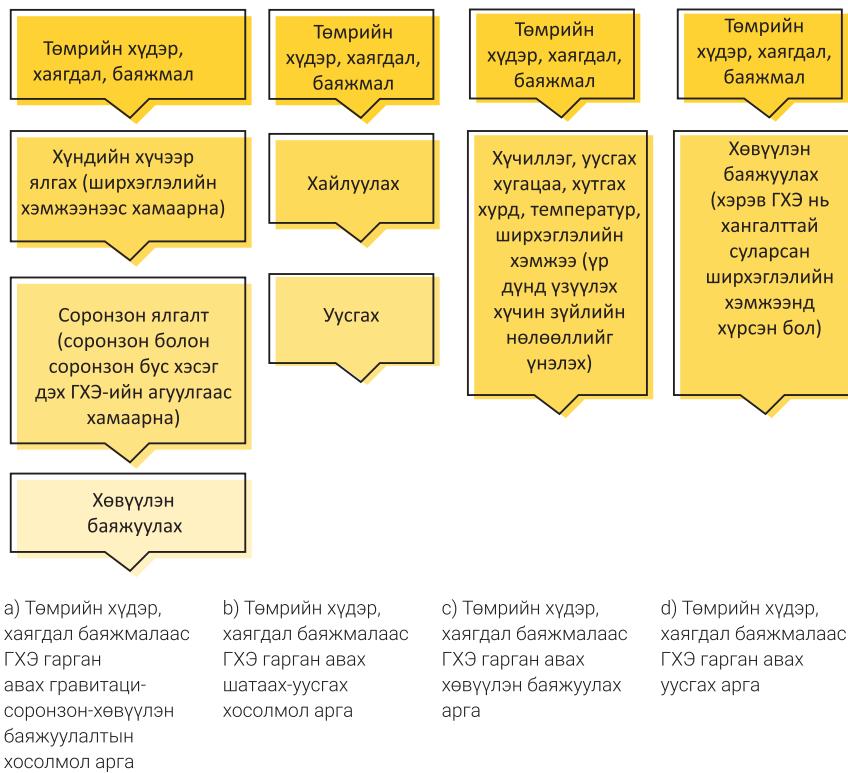
- Метал авалт сайтай үр дүн үзүүлсэн тул төмрийн хаягдлыг хайлуулах аргын талаар илүү их судалгаа хийх хэрэгтэй.

- Төмрийн хүдрийн флотацийн хаягдалд ГХЭ-ийн баяжилт явагдаагүй, харин соронзон ялгалт нь тодорхой хэмжээгээр баяжуулсан болохыг харуулж байна.

Эдгээр дээр үндэслэн дээжүүд нь ГХЭ агуулсан байвал цаашид туршилт хийх боломжит хувилбаруудыг харгалzan үзэж болох хэд хэдэн хураангуй процессийн схем гаргаж байна (Зураг 11). Эдгээр процесс схемүүд нь ГХЭ агуулсан төмөртэй холбоотой эх үүсвэрүүдийн шинж чанар болон ГХЭ гаргаж авах зорилгоор тэдгээрт хийсэн олон төрлийн туршилтын үр дүнг ойлгоход чиглэсэн судалгаанд тулгуурлан санал болгосон гэдгийг тэмдэглэе.

Тохиромжтой процессыг үнэлэхийн тулд ГХЭ агуулсан төмөртэй холбоотой хоёрдогч эх үүсвэрийн дээжинд дараах шинжилгээг хийхийг зөвлөж байна.

1. Химийн шинжилгээ (ICP REE)
2. Эрдсийн шинжилгээ  
(Минералоги, Петрографи)
3. Ширхэглэлийн шинжилгээ  
(Шигшүүр)
4. Ширхэглэлийн ангилалууд дахь ГХЭ-ийн агуулга
5. Соронзон ба соронзон бус хэсгүүд дэх ГХЭ-ийн агуулга



**Зураг 11.** Төмрийн хүдэр, баяжмал болон хаягдаас ГХЭ гаргаж авах боломжит схемүүд

## 1.12

## Нүүрсний үнснээс газрын ховор элемент гарган авах арга

Төмрийн хүдрийн хаягдал болон нүүрсний үнснээс ГХЭ-ийг гарган авах судалгаануудыг харьцуулж үзвэл дэлхий даяар нүүрсний үнсэн дээр хийсэн судалгаа, туршилтууд олон хийгдсэн байна. Үнс дээр хийгдсан судалгаануудын үр дүнд үндэслэн дараах дүгнэлтүүдийг хийж болно.

- Үнс нь талст ба аморф гэж нэрлэгддэг хоёр үндсэн агуулгаас бүрддэг [21]. Аморф фаз нь ойролцоогоор 60-90%, үлдсэн хэсэг нь талст үе юм.
- Талст фазуудад голчлон кварц, муллит, гематит, магнетит, феррит шпинель, ангидрит, мелилит, мервинит, периклаз, трикальцийн алюминат, шохой орно.
- Нүүрсний үнсний ялгаа ба

тэдгээрийн шинж чанар нь нүүрсний гарал үүслээс ихээхэн хамаардаг [22].

- Нүүрсний үнсэн дэх нано хэмжээст талст нь үнсний шилэнд атомаар тархсан хэт нарийн ширхэгтэй эрдсүүдтэй ижил байна [23].

- Үнсэн дэх ГХЭ-ийн агууламжийг баяжуулсан ч анхдагч нүүрсэнд агуулгадах ГХЭ-ийн агуулгаас бага байна [23].

ГХЭ нь уурын зуухны температурт үүссэн алюминосиликат шилэнд шилждэг [24].

Хүснэгт 6 ба Хүснэгт 7-д нүүрсний үнсний дээжинд хийсэн олон төрлийн ялган авах аргуудын үр дүнгийн хураангуйг үзүүлэв.

Хүснэгт 6. Дэгдэмхий үнсний дээжинд хийсэн туршилтуудын үр дүн

Эх үүсвэр	Арга, аргачлал	Үр дүн
Дэгдэмхий үнс	Нягтаар ялгах	ГХЭ нь илүү хунд хэсгүүдэд баяжигдана гэсэн таамгийг үгүйсгэв. ГХЭ-ийн эрдсүүд нь бага няятралтай эрдсүүдтэй нэгдэж, дэгдэмхий үнсний тоосонцор дотор тархдаг.
		Нягтаар ялгах арга нь үр ашиггүй байх магадлалтай.
		Хэт нарийн ширхэгтэй ГХЭ-ийн эрдсүүдээс хамаарч нягтад суурилсан ялгах аргууд үр дүн муутай байсан.
	Нягтаршлын ангиллын туршилт	2.71-2.95 SG болон 2.45-2.71 SG
	Соронзондоор ялгах	Соронзон чанар багасах тусам ГХЭ-ийн агуулга өсөж байна.
	Нүүрсний дэгдэмхий үнсэн дэх ГХЭ-ийн тархалт	Нүүрсний дэгдэмхий үнсний хамгийн элбэг хэсэг болох шилэн үе дэх ГХЭ-ийг гарган авах, баяжуулахад чиглүүлэх хэрэгтэй. Al, Si-тай хүчтэй хамааралтай.
	Хүчлийн уусгалт	Химийн болон дулааны урьдчилан боловсруулалт нь хүчлийн уусгалтын гүйцэтгэлийн үр дүнд сайнаар нөлөөлнө.

**Хүснэгт 7.** Дэгдэмхий үнсний дээжинд хийсэн туршилтуудын үр дүн [25]

Дээж	Эх үүсвэр	Бэлтгэл ажил	Үусгагч	Үусгах нөхцөл	Үр дүн
Үнс	Лабораторид бэлтгэсэн	Байхгүй	HCl, HF, HNO <sub>3</sub>		Метал авалт 35-90% (Ce, Nd, Y)
Дэгдэмхий үнс	Хятад, Өмнөд солонгос, АНУ	Байхгүй	HCl, HF, HNO <sub>3</sub>	Ялгаатай зутангийн нягт, температур, хугацаа	32-90% металл авалтын хязгаар дахь үр дүн (тогтмол бус үр дүн)
		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , хатуу шингэний харьцаа 1:1, 860%	HCl, HNO <sub>3</sub>		Харьцангуй сайн тогтвортой үр дүн (70-90%)
		40% NaOH, шингэний харьцаа 10:1, 150, 2цаг	HCl, HNO <sub>3</sub>		

Эдгээр үр дүнд үндэслэн дээжүүд нь ГХЭ агуулсан байвал цаашид туршилт хийх боломжит хувилбаруудыг харгалзан үзэж болох хэд хэдэн хураангуй процессийн схем гаргаж байна.

- Дэгдэмхий үнсэнд бага нягтралтай эрдсүүд тархдаг тул нягтаар ялгах аргууд нь сайнгүй үр дүнтэй байсан.
- Соронзон шинж чанар буурах тусам ГХЭ агууламж нэмэгдэх магадлал бий. Үнсэн дэх ГХЭ-ийн тархалт нь Al, Si-тай өндөр хамааралтай.
- Химийн болон дулааны урьдчилсан боловсруулалт нь металл авалтанд өндөр нөлөө үзүүлэх боломжтой.
- Шаталсан үусгах процесс сайн

үр дүнд хүргэсэн тохиолдууд байдаг.

- Ширхэглэлийн хэмжээ өсөх тусам ГХЭ-ийн агуулга буурдаг. Үр дүнг сайжруулахын тулд янз бүрийн аргуудыг хослуулан хэрэглэдэг (Зураг 12).

Тохиромжтой процессыг үнэлэхийн тулд ГХЭ агуулсан дэгдэмхий үнсний дээжинд дараах шинжилгээнүүдийг хийдэг.

- Химийн шинжилгээ (ICP REE)
- Эрдсийн шинжилгээ (Минералоги, Петрографи)
- Ширхэглэлийн шинжилгээ (Шигшүүр)
- Ширхэглэлийн ангиллууд дахь ГХЭ-ийн агуулга
- Соронзон ба соронзон бус хэсгүүд дэх ГХЭ-ийн агуулга



**Зураг 12.** Нүүрсний үнснээс ГХЭ гарган авах

# 2

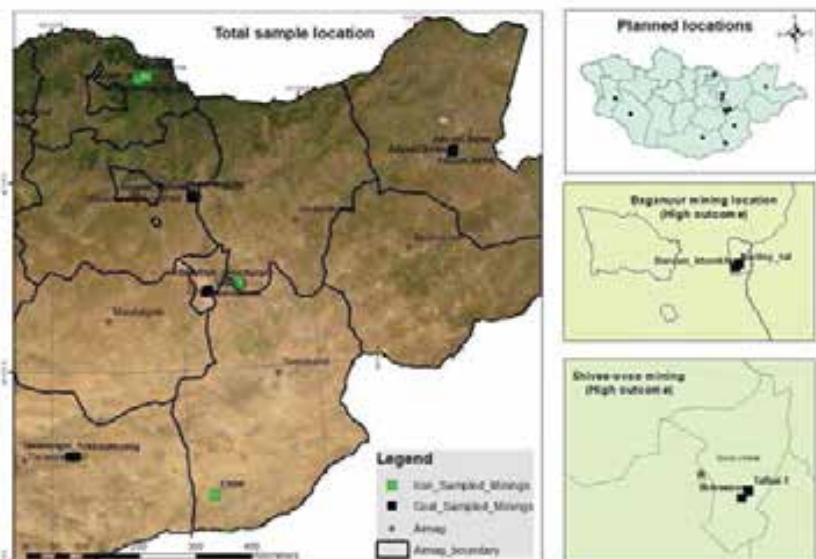
## Судалгааны арга зүй

Дэлхий нийтэд уурхайн хаягдал нь хүний эрүүл мэнд болон байгаль орчинд сөрөг нөлөөтэй гэж үздэг. Харин одоо уурхайн хаягдлаас ГХЭ гарган авах судалгаа хийгдсэнээрээ хаягдлыг дахин боловсруулж эдийн засгийн үр ашигтай болгох боломж бүрдэж байна. Иймд Монголд хоёрдогч эх үүсвэрээс газрын ховор элементийг гарган авах боломжийг судлах чухал хэрэгцээ байна. Уг судалгааг Эрдэнэс Монгол ХХК-ны

Газрын Ховор Элементийн Судалгааны Нэгжээс санал болгосноор өмнө хийгдсэн судалгааны өгөгдөл тулгуурлан дээж цуглуулах уурхай болон цахилгаан станцыг сонгосон. Нийт 6 нүүрсний уурхай, 3 төмрийн хүдрийн уурхай болон 2 дулааны цахилгаан станцын үнснээс нийт 43 дээжийг цуглуулсан. Дээж цуглуулсан компаниудын ерөнхий мэдээллийг Хүснэгт 8, байршлыг Зураг 13-т тус тус харуулав.

**Хүснэгт 8.** Дээж цуглуулсан компаниудын ерөнхий мэдээлэл

Nº	Компани	Ордын нэр, төрөл	Байршил
<b>Төмрийн хүдрийн дээж</b>			
1	Дарханы төмөрлөгийн үйлдвэр ХК	Төмөртэй төмрийн хүдрийн орд	Сэлэнгэ аймаг, Хүдэр сум
2	Монголросцветмет ТӨҮГ	Баргилт төмрийн хүдрийн орд	Хэнтийн аймаг, Дархан сум
3	Монлаа ХХК	Элстэй төмрийн хүдрийн орд	Дорноговь аймаг, Хатанбулаг сум
<b>Нүүрсний дээж</b>			
4	Энержи Ресурс ХХК	Ухаан худаг нүүрсний орд	Өмнөговь аймаг, Цогцэций сум
5	Адуунчуулун ХК	Адуунчуулууны нүүрсний орд	Дорнод аймаг, Хэрлэн сум
6	Багануур ХК	Багануур нүүрсний орд	Улаанбаатар хот, Багануур дүүрэг
7	Шарын гол ХК	Шарын голын нүүрсний орд	Дархан-Уул аймаг, Шарын гол сум
8	Шивээ Овоо ХК	Шивээ Овоо нүүрсний орд	Говьсүмбэр аймаг, Шивээговь сум
9	Мига Эрин ХХК	Бор Хулангийн нүүрсний орд	Дорноговь аймаг, Даланжаргалан сум
<b>Дулааны цахилгаан станц</b>			
10	ДЦС-4 ТӨХК	ДЦС	Улаанбаатар хот, Баянгол дүүрэг
11	Дорнод бүсийн эрчим хүчний систем ТӨХК	ДЦС	Дорнод аймаг, Чойбалсан хот



*Зураг 13.* Дээж цуглуулсан ордын байршлыг газрын зураг дээр тэмдэглэсэн зураглал

## 2.1 Судалгааны үр дүн

Энэхүү судалгаанд ашиглах нийлбэрийг тодорхойлсон. Нүүрсний зорилгоор нүүрс, төмрийн хүдрийн дээжинд ГХЭ тодорхойлохдоо үнсэнд ордууд болон цахилгаан станцаас тодорхойлсон. Шинжилгээний үр дүнг цуглуулсан дээжинд бүгдэд нь Хүснэгт 9 -д харуулсан. Химийн шинжилгээгээр ГХЭ-ийн

*Хүснэгт 9.* Бүх дээжний ГХЭ-ийн нийлбэр агуулга

№	Дээжийн тодорхойлолт	Компани нэр	ГХЭ-ийн нийлбэр нэгж ртт
1	Бор Хулан нүүрс	Мига Эрин ХХК	493.79
2	Баганур БН5	Баганур ХК	353.53
3	Бүхэл дээж	Шарын гол ХК	303.53
4	ШО, 5-р давхарга	Шивээ Овоо ХК	296.86
5	ДЦС-4- үнс	Дулааны цахилгаан станц-4 ТӨҮК0	254.78
6	БН коксжсон нүүрс	Энержи Ресурс ХХК	246.05
7	САЖ дээд	Шарын гол ХК	218.35

8	Багануур БН2	Багануур ХК	207.39
9	УХ коксжсон нүүрс	Энержи Ресурс ХХК	199.07
10	БН эрчим хүчиний нүүрс (SSCC)	Энержи Ресурс ХХК	195.75
11	ШО, 2-2 давхарга	Шивээ Овоо ХК	192.35
12	Багануур БН1	Багануур ХК	188.53
13	УХ хаягдал (SC-541)	Энержи Ресурс ХХК	187.43
14	Ф.Б хоссон чулуу	Монголросцветмет ТӨҮГ	173.09
15	Дорнод ДЦС-үнс	Дорнод бүсийн эрчим хүчиний систем ТӨХК	167.44
16	Багануур БН3	Багануур ХК	166.97
17	БН тэжээл (PF-231)	Энержеи Ресурс ХХК	165.92
18	УХ тэжээл (PF-231)	Энержеи Ресурс ХХК	165.50
19	ШО, 2-1 давхарга	Шивээ Овоо ХК	162.29
20	УХ хаягдал (FP)	Энержеи Ресурс ХХК	159.04
21	БН хаягдал (SC-541)	Энержи Ресурс ХХК	140.50
22	Багануур БН4	Багануур ХК	124.74
23	УХ эрчим хүчиний нүүрс (НСС)	Энержи Ресурс ХХК	121.95
24	СААЖ доод	Шарын гол ХК	113.16
25	Хаягдал	Монголросцветмет ТӨҮГ	107.58
26	УХ хаягдал (SC-446)	Энержи Ресурс ХХК	104.44
27	БН хаягдал (FP)	Энержи Ресурс ХХК	104.39
28	Адуун чулун нүүрс	Адуунчулун ХК	93.60
29	Бүхэл хаягдал	Дарханы төмөрлөгийн үйлдвэр ХК	88.51
30	БН хаягдал (SC-446)	Энержи Ресурс ХХК	87.81
31	Нунтаг дээж	Монлаа ХХК	84.81
32	Төмрийн баяжмал 65%	Монголросцветмет ТӨҮГ	48.19
33	Цайрын /шлам/	Монголросцветмет ТӨҮГ	46.66
34	Исэлдсэн хаягдал	Дарханы төмөрлөгийн үйлдвэр ХК	44.84
35	Төмрийн баяжмал 52%	Монголросцветмет ТӨҮГ	43.86
36	Тэжээл	Монголросцветмет ТӨҮГ	43.85
37	Анхдагч хүдэр	Монлаа ХХК	43.84
38	Завсарын бут.	Монголросцветмет ТӨҮГ	40.34
39	Нунтаг хаягдал	Дарханы төмөрлөгийн үйлдвэр ХК	39.88
40	Цайрын хүдэр	Монголросцветмет ТӨҮГ	34.16
41	Бүхэл баяжмал	Дарханы төмөрлөгийн үйлдвэр ХК	33.27
42	Нунтаг баяжмал	Дарханы төмөрлөгийн үйлдвэр ХК	31.79
43	Анхдагч хүдэр	Дарханы төмөрлөгийн үйлдвэр ХК	31.32

ГХЭ-ийн нийлбэрээр тооцоолсон шинжилгээний үр дүнгээс харахад Мига Эрин ХХК-ийн Бор Хулан нүүрсний уурхайн дээж 493.79 ррт, Багануур ХК-ын Багануур БН5 дээж 353.53 ррт, Шивээ Овоо ХК-ийн 5-р давхаргын дээж 296.86 ррт, болон ДЦС-4 ТӨХК-ийн зуухны үнс 254.78 ррт тус тус нийлбэр ГХЭ-ийн агуулгууд тодорхойлогдсон. Үүнээс үзэхэд төмрийн хүдрийн дээжнээс илүү нүүрсний уурхайн дээж болон цахилгаан станцын үнсэнд өндөр агуулгатай газрын ховор элемент

тодорхойлогдсон. Тэр дундаа хүрэн нүүрсний уурхайн дээжинд ГХЭ их байгаа нь дээрх үр дүнгээс харагдаж байна. Мөн ДЦС-4 ТӨХК-ийн зуухны үнс нь ГХЭ өндөр агуулга заасан ДЦС-ын тэжээлийн нүүрс нь эрчим хүчний зориулалттай ашигладаг бага илчлэгтэй хүрэн нүүрс байдагтай холбоотой гэж үзэж байна.

Нийт 43 дээжээс ГХЭ-ийн нийлбэр агуулгаар хамгийн өндөр агуулга заасан эхний 5 дээжийг сонгон авч үр дүнг хооронд нь харьцуулсан (Зураг 14).



*Zuраг 14. ГХЭ-ийн агуулга өндөртэй дээжийн харьцуулалт (ррт-ээр)*

Графикаас харахад 43 дээжүүд дотроо өндөр агуулга заасан эхний 5 ордын дээжийн зүй тогтлыг ажиглаж үзэхэд бүгд хүрэн нүүрсний уурхайн дээж байна.

## 2.2

# Нүүрс болон нүүрсний үнсэн дэх газрын ховор элементийн агуулга

Монгол улс нь нүүрсний нөөцөөрөө баялаг орон. Нүүрс нь олон төрлийн элементүүдийг агуулж байдаг. Нүүрсэнд үелэх системийн байгальд орших элементүүдээс одоогоор инертийн хийнүүд, полоний, франций, актиний г.м зарим цацраг идэвхитэй элементүүдээс бусад 76 элементийг илрүүлээд байна.

Нүүрсэнд ГХЭ < 0.01% < 100 ppm агуулагддаг. ГХЭ нүүрсэнд хэдийгээр бага хэмжээгээр агуулагдах боловч нүүрсний олборлолт, боловсруулалтын хэмжээнээс шалтгаалан ГХЭ агуулга хэмжээ нэмэгдэж үйлдвэрлэлийн ач холбогдолтой байх боломжтой. Нүүрсийг шатаах, баяжуулах явцад гарах үнс, хаягдалд

зарим газрын ховор элементийн агуулга нүүрсэнд байснаас 5-10 дахин ихсэж, улмаар үйлдвэрийн аргаар ялан авах боломжийг бүрдүүлж болно [26].

Энэхүү судалгаанд өмнө хийсэн судлаачдын ГХЭ-ийн геологийн өгөгдлийн судалгааны үр дүнд үндэслэн ГХЭ байх магадлалтай Энержи Ресурс ХХК, Адуунчулуун ХК, Багануур ХК, Шарын гол ХК, Шивээ Овоо ХК, болон Мига Эрин ХХК гэсэн нийт б нүүрсний ордын дээжийг шинжилгээнд хамруулсан. Шинжилгээний үр дүнгүүдээр тухайн ордын дээжин дэх ГХЭ-ийн тархалтыг харуулсан.



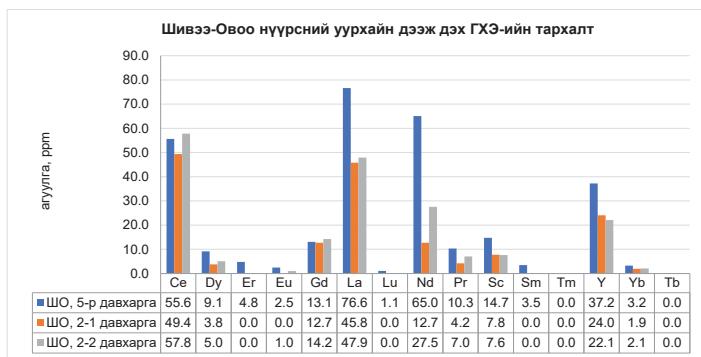
Зураг 15.  
Багануурын  
нүүрсний  
урхайн дээж  
дэх ГХЭ-ийн  
тархалт

Багануурын нүүрсний уурхайгаас нийт 5 дээж сонгон авсан. Шинжилгээний үр дүнд Ce, La, Nd, Sc болон Y гэх элементүүд бусад

ГХЭ-үүдээс арай өндөр агуулга зааж байгаа нь график дээрээс харагдаж байна. Мөн 5 дээжнүүд дундаа БН5 дугаартай дээжинд Ce - 50.40 ppm, La -

48.06 ppm, Nd - 51.99 ppm, Sc-26.35 ppm болон Y - 113.7 ppm-ийн агуулга тус тус тодорхойлогдсон ба эдгээр элементүүд нь бусад дээжид тодорхойлогдоноос харьцангуй өндөр агуулгатай байна.

Шинжилгээ хийсэн 5 дээжид тус тусад нь ГХЭ-ийн нийлбэрийг тооцож үзэхэд БН1 188.53 ppm, БН2 207.39 ppm, БН3 166.97 ppm, БН4 124.74 ppm, болон БН5 353.53 ppm байна (Зураг 15).



Зураг 16.

Шивээ  
Овоогийн  
нүүрсний  
уурхайн дээж  
дэх ГХЭ-ийн  
тархалт

Шивээ Овоогийн нүүрсний уурхайгаас нийт 3 дээж сонгон авсан. Мөн 3 дээжүүд дундаа 5-р давхаргын дээжинд Ce - 55.60 ppm, La - 76.64 ppm, Nd - 65.04 ppm, болон Y - 37.24 ppm-ийн агуулга тус тус тодорхойлогдсон ба эдгээр элементүүд нь бусад дээжээс тодорхойлогдоноос харьцангуй өндөр агуулгатай байна. 3 дээжний

ГХЭ-ийн нийлбэрээр нь тооцож үзэхэд 5-р давхаргын дээжинд 296.86 ppm, 2-1-р давхаргын дээжинд 162.29 ppm, 2-2-р давхаргын дээжинд 192.35 ppm тус тус байна. Шинжилгээний үр дүнд Ce, La, Nd, болон Y гэх элементүүд бусад ГХЭ-түүдээс арай өндөр агуулга зааж байгаа нь график дээрээс харагдаж байна (Зураг 16).



Зураг 17.

Шарын голын  
нүүрсний  
уурхайн дээж  
дэх ГХЭ-ийн  
тархалт

Шарын голын нүүрсний уурхайгаас нийт 3 дээж сонгон авсан.

Шинжилгээний үр дүнд Ce, La, Nd, Sc болон Y гэх элементүүд бусад ГХЭ-

түүдээс арай өндөр агуулга зааж байгаа нь графикаас харагдаж байна (Зураг 17). Мөн З дээжнүүд дундаа бүхэл дээжинд Ce - 61.87 ppm, La - 56.84 ppm, Nd - 24.91 ppm, Sc-42.85 ppm болон Y - 70.62 ppm-ийн агуулга тус тус тодорхойлогдсон ба эдгээр тус тус элементүүд нь бусад дээжнээс тодорхойлогдсоноос харьцангуй өндөр агуулгатай байна. З дээжний ГХЭ-ийг нийлбэрээр нь тооцож үзэхэд Бүхэл дээж (нүурс) - 303.53 ppm, СААЖ доод - 113.16 ppm, СААЖ дээд - 218.35 ppm тус тус байна (Зураг 17).



**Зураг 18.**  
Бор Хулан нүүрсний уурхайн дээж дэх ГХЭ-ийн тархалт

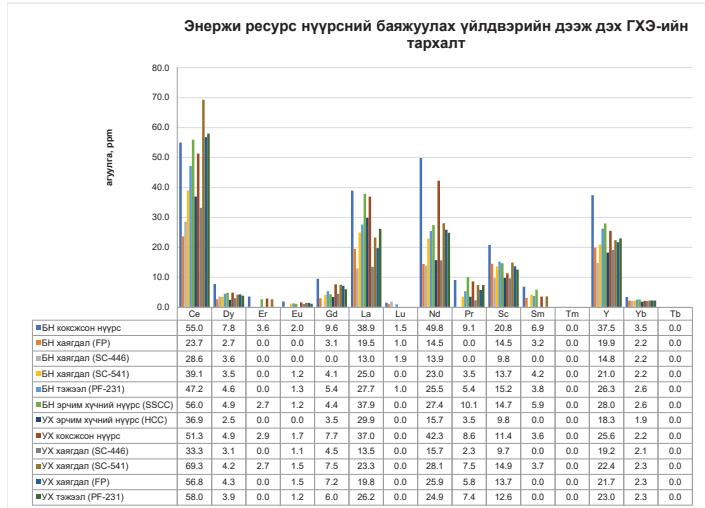
Бор Хулангийн нүүрсний уурхайгаас 1 дээж сонгон авсан. Шинжилгээний үр дүнд Ce, La, Nd, болон Y гэх элементүүд бусад ГХЭ-түүдээс арай өндөр агуулга зааж байгаа нь график дээрээс харагдаж байна. Мөн дээжид Ce - 74.00 ppm, La - 128.6 ppm, Nd - 103.03 ppm, болон Y - 97.51 ppm-ийн агуулга тус тус тодорхойлогдсон. ГХЭ-ийн нийлбэрээр нь тооцож үзэхэд 493.79 ppm байна (Зураг 18).



**Зураг 19.**  
Адуунчuluуны нүүрсний уурхайн дээж дэх ГХЭ-ийн тархалт

Адуунчuluун нүүрсний уурхайгаас 1 дээж сонгон авсан. Шинжилгээний үр дүнд Ce, La, болон Y гэх элементүүд бусад ГХЭ-түүдээс арай өндөр агуулга зааж байгаа нь график дээрээс харагдаж байна. Мөн дээжид Ce - 19.3

ppm, La – 23.7 ppm, болон Y - 21.6 ppm- ГХЭ-ийн нийлбэрээр нь тооцож ийн агуулга тус тус тодорхойлогдсон. үзэхэд 93.60 ppm байна (Зураг 19).



**Зураг 20.**  
Энержи ресурс нүүрсний баяжуулах үйлдвэрийн дээж дэх ГХЭ-ийн тархалт

Энержи ресурсын нүүрсний баяжуулах үйлдвэрээс нийт 12 дээж авсан. Шинжилгээний үр дүнд Ce, La, Nd, болон Y гэх элементүүд бусад ГХЭ-түүдээс арай өндөр агуулга зааж байгаа нь график дээрээс харагдаж байна (зураг 20). Шинжилгээ хийсэн 12 дээжийг тус бүрийн ГХЭ-ийн нийлбэрийг тооцож үзэхэд БН коксжон нүүрс 246.05 ppm, БН

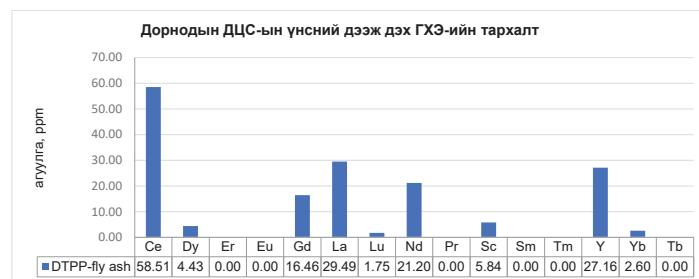
хаягдал (FP) 104.39 ppm, БН хаягдал (SC-446) 87.81 ppm, БН хаягдал (SC-541) 140.50 ppm, БН тэжээл 165.92 ppm, БН эрчим хүчин нүүрс (SSCC) -195.75 ppm, УХ эрчим хүчин нүүрс (HCC) -121.95 ppm, УХ коксжон нүүрс 199.07 ppm, УХ хаягдал (SC-446) 104.44 ppm, УХ хаягдал (SC-541) 187.43 ppm, УХ хаягдал (FP) 159.04 ppm, болон УХ тэжээл (PF) 165.50 ppm тус тус байна.



**Зураг 21.**  
ДЦС-4-ийн үнсний дээж дэх ГХЭ-ийн тархалт

ДЦС-4-ийн үнснээс 1 дээж сонгон авсан. Шинжилгээний үр дүнд Ce, La болон Y гэх элементүүд бусад ГХЭ-түүдээс арай өндөр агуулга

зааж байгаа нь график дээрээс тус тус тодорхойлогдсон. ГХЭ-ийн харагдаж байна (Зураг 21). Мөн нийлбэрээр нь тооцож үзэхэд 254.78 дээжид Ce - 93.63 ppm, La - 44.36 ppm, ppm байна (Зураг 21). болон Y - 42.69 ppm - ийн агуулга



Зураг 22.  
Дорнодын  
ДЦС-ын үнсний  
дээж дэх ГХЭ-  
ийн тархалт

Дорнодын ДЦС-ын үнснээс 1 дээж сонгон авсан. Шинжилгээний үр дүнд Ce, La болон Y гэх элементүүд бусад ГХЭ-түүдээс арай өндөр агуулга зааж байгаа нь график дээрээс харагдаж байна (Зураг 22). Мөн дээжид Ce - 58.51 ppm, La - 29.9 ppm, болон Y - 27.16 ppm-ийн агуулга тус тус тодорхойлогдсон. ГХЭ-ийн нийлбэрээр нь тооцож үзэхэд 167.44 ppm байна.

Дээрх шинжилгээний үр дүнгүү дээр байгуулсан графикуудаас хараад бидний сонгон авч шинжлүүлсэн нүүрс болон нүүрсний бүтээгдэхүүнд Ce, La, Nd, Y, гэх ГХЭ-үүд бусдад нь

илүү агуулга тодорхойлогдсон байна. Үүнээсүзэхэд метаморфизмын үешат багатай нүүрс нь ГХЭ-ийг харьцаангуй өндөр агуулж байгаа бөгөөд энэ нь ихэвчлэн тэдгээрийн органик бодистой холбоотой байдаг. Өөрөөр хэлбэл нүүрсний метаморфизмын шат ихсэх явцад түүнд агуулагдах идэвхтэй функционал бүлэг цөөрөх тул давс хэлбэрээр агуулагдах ГХЭ болон ховор элементийн агуулга багасдаг. Тарчиг нүүрс болон антрацит нь ГХЭ бага агуулдаг нь үүнтэй холбоотой. Ийм учраас судалгаандаа эдгээр уурхайг сонгон авч, ГХЭ-ийг тодорхойлсон.

## 2.3 Төмрийн хүдэр болон баяжуулалтаас гарсан бүтээгдхүүн дэх газрын ховор элементийн агуулга

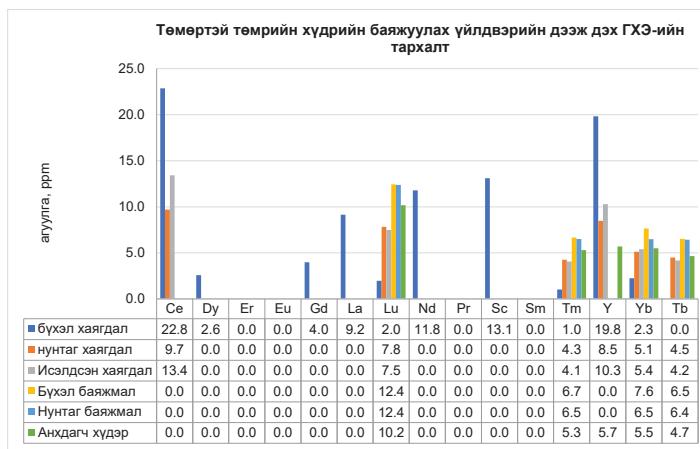
Сүүлийн үед төмрийн хүдрийн хаягдлаас ГХЭ-ийг ялгах судалгаа эрчимтэй явагдаж байна. Төмрийн хүдрийн төрөл болон баяжуулах процессоос нь хамаарч төмрийн хүдрийн хаягдал дахь ГХЭ-ийн агуулга өөр өөр байдаг. Хэрвээ флотацийн аргаар баяжуулсан бол хаягдал дахь ГХЭ агуулга бага байна (ГХЭ-ийн нийлбэр ойролцоогоор 20 ppm). Харин шатаах болон соронзон сепаратороор баяжуулсан бол хаягдал дахь ГХЭ нь илүү өндөр байна (ГХЭ-ийн нийлбэр ойролцоогоор 400 ppm). Зарим судалгаагаар төмрийн хүдрийн анхдагч дээжид ГХЭ-ийн агуулга нь

төмрийн хүдрийн хаягдал дахь ГХЭ-ийн агуулгаас бага байдаг гэж үзэж байна. Мөн ихэнх төмрийн хүдрийн хаягдалд кварц болон төмрийн хүдрийн ислээс бүрддэг бөгөөд хаягдал дахь газрын ховор эрдэс нь бастанезит, монацит байх магадлалтай ба эрдсийн мөхлөгийн хэмжээ 0.2-720 мкм байна.

Судалгаанд ашиглах дээжийг сонгоходоо газрын ховор элементийг агуулга байх боломжтой З төмрийн хүдрийн уурхайг сонгон авч дээж авсан.

Цуглуулсан дээжиндээ химийн шинжилгээгээр ГХЭ-ийг тодорхойлуулсан.

**Зураг 23.**  
Төмөртэй төмрийн хүдрийн баяжуулах үйлдвэрийн дээж дэх ГХЭ-ийн тархалт



Шинжилгээний үр дүнгүүдээр тухайн ордын дээжин дэх ГХЭ-ийн тархалтыг харьцуулсан графикаар харуулсан (Зураг 23).

Төмөртэй төмрийн хүдрийн уурхайгаас нийт б дээж сонгон авсан. Шинжилгээний үр дүнд Ce, La, Nd, Sc болон Y гэх элементүүд бусад ГХЭ-үүдээс арай өндөр агуулга зааж байгаа

нь график дээрээс харагдаж байна. Мөн б дээжнүүд дундаа төмрийн хүдрийн бүхэл хаягдлын дээжинд Ce - 22.84 ppm, La - 9.14 ppm, Nd - 11.78 ppm, Sc-13.09 ppm болон Y - 19.82 ppm-ийн агуулга тус тус тодорхойлогдсон ба эдгээр элементүүд нь бусад дээжнээс тодорхойлогдоноос харьцангуй өндөр агуулгатай байна (Зураг 23).



Зураг 24.  
Баргилтын төмрийн хүдрийн баяжуулах үйлдвэрийн дээж дэх ГХЭ-ийн тархалт

6 дээжний ГХЭ-ийн нийлбэрээр нь тооцож үзэхэд бүхэл хаягдал - 88.51 ppm, нунтаг хаягдал- 39.88 ppm, исэлдсэн хаягдал -3 -44.84 ppm бүхэл баяжмал - 33.27 ppm, нунтаг баяжмал - 31.79 ppm, анхдагч хүдэр (тэжээл) -31.32 ppm тус тус байна. Дүгнэлт хийхэд баяжмалаас илүү хаягдлын бүтээгдэхүүнд ГХЭ-ийн агуулга өндөр байгаа нь дээжийн ширхэглэл багасах үед газрын ховрын эрдсүүд чөлөөлөгдөж, ГХЭ-ийн агуулга өссөн байна.

Баргилтын төмрийн хүдрийн уурхайгаас нийт 4 дээж сонгон авсан. Шинжилгээний үр дүнд Ce, La, Nd болон Y гэх элементүүд бусад ГХЭ-

түүдээс арай өндөр агуулга зааж байгаа нь график дээрээс харагдаж байна. Мөн 4 дээжнүүд дундаа төмрийн хүдрийн хаягдлын дээжид Ce - 38.01 ppm, La - 28.96 ppm, Nd - 16.46 ppm , болон Y - 10.76 ppm-ийн агуулга тус тус тодорхойлогдсон ба эдгээр элементүүд нь бусад дээжнээс тодорхойлогдоноос харьцангуй өндөр агуулгатай байна. 4 дээжний ГХЭ-ийн нийлбэрээр нь тооцож үзэхэд төмрийн баяжмал (52%) - 43.86 ppm, баяжмал (65%) - 48.19 ppm, завсарын бүтээгдэхүүн - 43.86 ppm, хаягдал - 107.58 ppm байна (Зураг 24).



**Зураг 25.**  
Элстэй  
төмрийн  
хүдрийн  
урхайн дээж  
дэх ГХЭ-ийн  
тархалт

Элстэй төмрийн хүдрийн уурхайгаасанхадгчболон нунтаггэсэн 2 дээж сонгон авсан. Шинжилгээний үр дүнд Ce болон La гэх элементүүд бусад ГХЭ-үүдээс арай өндөр агуулга зааж байгаа нь график дээрээс харагдаж байна (Зураг 25). Мөн 2 дээжнээс нунтаг дээж нь дээжинд Ce - 22.64 ppm болон La - 26.93 ppm агуулга тус тус тодорхойлогдсон ба эдгээр элементүүд нь бусад дээжнээс тодорхойлогдсоноос харьцангуй өндөр агуулгатай байна. 2 дээжний ГХЭ-ийн нийлбэрээр нь тооцож үзэхэд анхдагч дээж - 43.81 ppm, нунтаг дээж- 84.81 ppm байна.

Дээрх төмрийн хүдрийн болон бүтээгдэхүүнд хийсэн химийн шинжилгээний үр дүнгээр байгуулсан харьцуулалтын графикуудаас харахад бидний сонгон авч шинжлүүлсэн дээжнүүдэд Ce, La, Nd, Sc, болон Y, гэх газрын ховор элементуудажиглагдаж байна. Мөн төмрийн хүдрийн дээжүүдийн зүй тогтлыг ажиглавал анхдагч дээжнээс илүү хаягдалд ГХЭ-ийн агуулга бусад бүтээгдэхүүнээ бодоход илүү тодорхойлогдсон байгаа нь төмрийн хүдэрт байгаа ГХЭ-үүд баяжуулах процессын дүнд чөлөөлөгдж, агуулга өссөн байна.

# 3

## Газрын ховор элементийн зах зээлийн өнөөгийн нөхцөл байдал

### 3.1 Газрын ховор элементийн үйлдвэрлэл

1948 он хүртэл дэлхийн ГХЭ-ийн дийлэнх хувийг Энэтхэг, Бразилийн шороон элсний ордуудаас авдаг байсан ба 1950-иад оны үед Өмнөд Африкийн баруун мух дахь Стингкамскаал уурхай дахь монацитаар баялаг орд дэлхийн ГХЭ-ийн эх үүсвэр байсан. Харин 1960-аас 1980-аад он хүртэл Калифорни дахь Моунтайн пэйсс (Mountain Pass) газрын ховор элементийн уурхай АНУ-ын тэргүүлэгч үйлдвэрлэгч байсан. Өнөөдөр Энэтхэг, Өмнөд Африкийн ордууд ГХЭ-ийн зарим баяжмалыг үйлдвэрлэсээр байгаа ч Хятадын үйлдвэрлэлийн дэргэд цар хүрээгээрээ бага байна. 2017 онд Хятад улс дэлхийн газрын ховор элементийн нөөцийн 81%-ийг үйлдвэрлэсэн бөгөөд дийлэнх буюу 36,7%-ийг нь Өвөр Монголоос олборложээ. Австрали нь дэлхийн үйлдвэрлэлийн 15%-ийг эзэлдэг хоёр дахь томоохон үйлдвэрлэгч юм [27]. Дэлхийн бүх хүнд ховор элемент (диспроз зэрэг) нь полиметалл Баян Обо орд зэрэг Хятадын газрын ховор элементээс гаралтай. Баруун Австралийн хойд хэсэгт орших Холлс Крикээс зүүн өмнөд зүгт 160

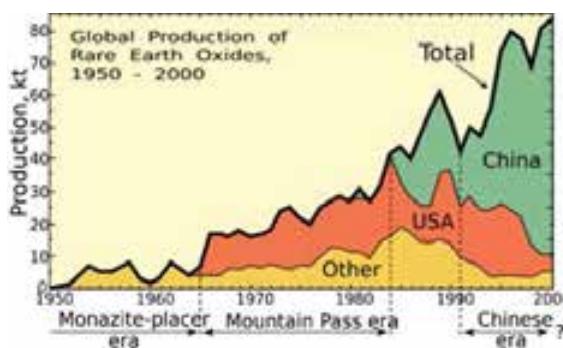
км-т орших Браунс Рэйнжийн уурхай нь одоогоор бүтээн байгуулалтын шатандаа байгаа бөгөөд Хятадаас гадна анхны томоохон диспрозиум үйлдвэрлэгч болох төлөвтэй байна [28].

Эрэлт нэмэгдсэн нь нийлүүлэлтэд хүндрэл учруулж, дэлхий дахинд газрын ховор металлын хомсдолд орох вийгэсэн болгоомжлол улам бүр нэмэгдсээр байна. 2009 оноос хойшхи хэдэн жилийн дараа дэлхийн ГХЭ-ийн эрэлт хэрэгцээ шинэ томоохон эх үүсвэрүүдийг бий болгохгүй бол жил бүр нийлүүлэлтээсээ 40,000 тонноор давах төлөвтэй байна. 2013 онд Европын холбоо эдгээр элементүүдээс хамааралтай, ГХЭ-ийг бусад элементүүдээр орлуулах боломжгүй, дахин боловсруулалт багатай зэргээс шалтгаалан ГХЭ-ийн эрэлт нэмэгдэнэ гэж мэдэгдсэн

Цаашилбал, эрэлт нэмэгдэж, нийлүүлэлт бага байгаагаас ирээдүйд үнэ өсөх хандлагатай байгаа бөгөөд Хятадаас бусад улс орнууд ГХЭ-ийн уурхай нээх боломж бий. ГХЭ нь өсөн нэмэгдэж буй мэдээллийн технологийн салбарт зайлшгүй шаардлагатай байдаг тул эрэлт

нэмэгдэж байна. ГХЭ-ийг ашигладаг шинэ бүтээгдэхүүнд ухаалаг утас, дижитал камер, компьютерийн эд анги, хагас дамжуулагч гэх мэт өндөр технологийн тоног төхөөрөмж

багтана. Үүнээс гадна сэргээгдэх эрчим хүчний технологи, цэргийн техник хэрэгсэл, шил үйлдвэрлэл, металлурги гэх мэт салбаруудад илүү түгээмэл ашиглагддаг.



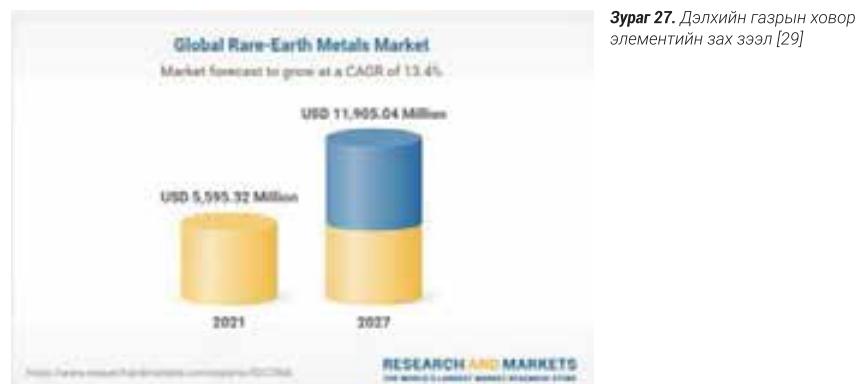
**Зураг 26.** Ислэдсэн газрын ховор элементийн үйлдвэрлэл дэлхийн хэмжээний [27]

2019 он гэхэд Хятад улс ГХЭ-ийн 17 төрлийн исэл үйлдвэрлэж, дэлхийн улс орнуудад 85-95 хувийг нийлүүлсэн. Үүний тал хувийг Мьянмарас экспортолсон хүдрээс гарган авсан. Тус улсад өнгөрсөн онд буюу 2021 онд болсон төрийн эргэлтийн дараа өндөр концентрацитай хүдрийн нийлүүлэлт хязгаарлагдаж магадгүй болсон юм. Түүнчлэн, БНХАУ нь АНУ

болон Европын холбооны орнуудаас тавьсан эдийн засгийн хориг арга хэмжээний эсрэг тэмцэхийн тулд ховор элементийн экспорт тоо дахин бууруулж магадгүй гэж таамаглаж байсан. ГХЭ-үүд нь цахилгаан машин үйлдвэрлэх, өндөр технологийн цэргийн хэрэглээнд чухал материал болдог.

## 3.2 Газрын ховор элементийн зах зээл

Дэлхийн ГХЭ-ийн зах зээлийн ба 13.40%-ийн жилийн нийлмэл хэмжээ 2021 онд 5,595.32 сая ам.доллараар үнэлэгдсэн байна. 2022 гэхэд 11,905.04 сая ам.долларт хүрэх онд 6,335.74 сая ам.доллар байх төлөвтэй байна [29].



Дэлхийн ховор металлын зах зээл 2021 онд 5595.3 сая доллараар үнэлэгдэх төлөвтэй байна. Дэлхийн ховор металлын зах зээлийн өсөлт 13.4%, 2027 он гэхэд 11905.0 сая доллар болно гэж тооцоолсон.

Баяжуулалтын аль аргыг сонгохоос хамаарч эдийн засгийн үр ашгийг нь тооцоолох боломжтой. Цаашлаад зах зээлийн судалгааг нарийвчлан хийж хэнд нийлүүлэх вэ гэдгээ харгалзаж үзэх хэрэгтэй болж байна.

**Хүснэгт 10.** 2015-2021 он хүртэлх газрын ховор элементийн ислийн сонгогдсон дундаж үнэ (ам.доллар/кг)

Газрын ховрын исэл	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Тербиумын исэл, хамгийн бага цэвэршилт 99.99%	564	415	501	455	507	670	1300
Диспрозийн исэл, хамгийн бага цэвэршилт 99.5%	279	198	187	179	239	261	400
Неодимийн исэл, хамгийн бага цэвэршилт 99.5%	48	40	50	50	45	49	49
Европийн исэл, хамгийн бага цэвэршилт 99.99%	344	74	77	53	35	31	31
Мишметалл, 65% церийн, 35% лантан	7	5	6	6	6	5	6
Лантан исэл, хамгийн бага цэвэршилт 99.5%	3	2	2	2	2	2	2
Церийн исэл, хамгийн бага цэвэршилт 99.5%	3	2	2	2	2	2	2

# 4

## Газрын ховор элементийг гарган авахад байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөлөл

Аж үйлдвэр хурдацтай хөгжиж эхэлснээс хойш дэлхий даяар ГХЭ-ийн хайгуул, олборлолтын эрэлт хэрэгцээ хурдацтай нэмэгдэж байна. Иймд байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөллийг тодорхойлох үндсэн шаардлага манай орны хувьд ч тулгараад байна.

Судалгааны энэ хэсэгт нүүрсний үнснээс буюу хоёрдогч эх үүсвэрээс ГХЭ-ийг гарган авах үйлажиллагаанаас гарч болзошгүй байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөллийг тодорхойлов. Нүүрсний үнс нь Монгол оронд ашиглагдаж байгаа нийт 30 орчим дулааны цахилгаан станцаас хаягдал хэлбэрээр гардаг. Үнс нь байгалийн нөөцийг ашиглаад, түүнээс хаягдсан үйлдвэрлэлийн

дараах хаягдал гэдэг утгаараа байгалийн нөөц биш юм. Үнсийг дотор нь дэгдэмхий болон дэгдэмхий бус үнс гэж ангилдаг.

Дэгдэмхий үнсийг Дулааны 4-р цахилгаан станц, Амгалан ДЦС хаягдал хэлбэрээр ялгаж болохуйцаар гаргаж байна. Манай оронд нүүрсийг дулаан болон цахилгаан эрчим хүчний зориулалтаар ашигладаг тул уур амьсгалын хувьд нүүрсний "зайлшгүй хэрэглээ"-тэй оронд тооцогдоно.

Энэхүү хаягдал нь дулааны цахилгаан станцын хаягдлын даланд ил хаягдаж, чийг нь агаарт ууршиж, үлдэгдэл хэсэг нь хэрсөнд үлддэг.

### 4.1 Байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөөлөл

Байгаль орчинд учирч болзошгүй хор хөнөөлийг урьдчилан таамаглахын тулд ГХЭ-ийг хоёрдогч эх үүсвэрээс нь гарган авах процессоос байгаль орчинд үзүүлэх бүх төрлийн нөлөөллийг тодорхойлох шаардлагатай байдаг.

Энэ судалгаагаар хэд хэдэн сонирхолтой үр дүн гарсан. Тухайлбал хамгийн өндөр агуулгатай эх үүсвэрүүдийн нэг нь дулааны цахилгаан станцын

нүүрсний үнс байв. Иймээс бид энэхүү нүүрсний үнснээс ГХЭ гарган авах технологийн үйл явц нь хүрээлэн буй орчинд үзүүлэх нөлөөллийг түүний өндөр эрсдэлтэй бүрэлдэхүүн тус бүрт нь тодорхойлов.

Энэ хэсэгт анхдагч эх үүсвэрээс биш, хоёрдогч эх үүсвэрээс ГХЭ-ийг гарган авах процесс нь байгаль орчинд ямар эерэг болон сөрөг нөлөө үзүүлдгийг тодорхойлов.

- Үүнд:
1. Агаарт үзүүлэх нөлөөлөл
  2. Хөрсөнд үзүүлэх нөлөөлөл
  3. Ургамалд үзүүлэх нөлөөлөл

## Агаарт үзүүлэх нөлөөлөл

Үйл ажиллагаанаас агаар орчинд үзүүлэх хамгийн өндөр нөлөөлөл нь агаарын нарийн тоосны ширхэглэг бөгөөд, үүнийг ялгарлын коэффицентийг ашиглан тодорхойлдог [31]. Ялгарлын коэффициент гэдэг нь тоосны ялгарлын эрчмийг буюу тухайн хугацаанд агаарт ялгарсан бохирдуулагчийн хэмжээг тухайн үйл ажиллагааны түвшинд үржүүлсэн

статистик дундаж юм. Нүүрсний үнс зэрэг аливаа эх үүсвэрээс гарч буй бохирдуулагч бодисын нийт хэмжээ нь эх үүсвэр бүрийн ялгарлын коэффициентийг эх үүсвэр бүрийн тоогоор үржүүлсэнтэй тэнцүү байна. Агаар бохирдуулагч нь эх үүсвэр бүрээс ялгараах бөгөөд тэдгээрийн ялгаралтын хүчин зүйлийг тооцох шаардлагатай.

### Тоос ялгаруулах хүчин зүйлийн тэгшитгэл [32]

$$E = A \times EF \times (1-ER/100)$$

E = ялгарал; A = үйл ажиллагааны түвшин

EF = Тоос ялгаруулах хүчин зүйл,

ER = нийт ялгаралтыг бууруулах үр ашиг %

**Хүснэгт 11.** Нүүрсний үнснээс ГХЭ-ийг гарган авах урьдчилан боловсруулах технологийн үе шатууд

Технологийн нэр	Үндсэн процесс	Нарийвчилсан технологийн процесс
Автомшинаар зөөвөрлөн хүргэх, буулгах явц	Үнсээ тээвэрлэх	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Үнс холих</li> <li>- Савлах</li> <li>- Тээвэрлэх/ тээврийн зайд</li> <li>- Ачих</li> </ul>
	Үнсний урьдчилан бэлтгэл	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Шилжүүлэн ачих</li> <li>- Буулгах</li> <li>- Үнсийг бэлтгэх</li> <li>- Савлах</li> <li>- Хаях</li> </ul>



**Зураг 28.** ДЦС-4 нүүрсний үнс, нүүрсний овоолгын байдал

## Хөрсөнд үзүүлэх нөлөөлөл

ГХЭ-ийг гарган авах процессоос анхан шатны хөрсөнд үзүүлэх сөрөг нөлөөллийг авч үзэхэд, ДЦС-ын үнснээс ГХЭ-ийг гарган авсны дараа тухайн гарганavalтад орсон хэсгээс ихэнх хэмжээний хаягдал үнс ил задгай талбайд хаягдах төлөвтэй байна. Өөрөөр хэлбэл нийт дахин

ашигласан үнснээс 1 хүрэхгүй хувь нь л ГХЭ байна.

Судалгааны материалын хувьд аливаа сөрөг нөлөөллийг тооцоход эрт байгаа хэдий ч ДЦС-4-ийн үнсийг дахин боловсруулснаар байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөлөл нь "дунд" түвшинд байх магадлалтай байна.

## Усанд үзүүлэх нөлөөлөл

Үнсийг дахин ашиглах процесс нь өөрөө байгаль дээр байдаг цэвэр усанд үзүүлэх нөлөөлөл нь "бага" эрсдэлтэйд тооцогдох юм. Харин баяжуулах процесстоо ус ашиглах,

далангийн технологи, арга аргачлал ашиглах болбайгаль орчинд нөлөөлөх нөлөөллийг тооцоолох шаардлагатай юм.

## 4.2 Байгаль орчинд үзүүлэх бусад нөлөөлөл

Өмнө хийгдсэн судалгаануудаас үзэхэд ГХЭ-ийг хоёрдогч эх үүсвэрээс гарган авахад дараах эерэг нөлөөллүүд байна:

1. Нүүрсний үнсэнд агуулагдах K, U, Th зэрэг өндөр түвшний цацраг идэвхтэй элементүүд нь хүний эрүүл мэндэд сөрөг нөлөөтэй ч ногөө талаас ургамлыг дэмжих хөрсийг бордох үйл явцад эерэг нөлөө үзүүлдэг байна [33], [34].

2. Унаган байгалиараа байгаа анхдагч орд газрыг ашиглахад ямар ч орчин үеийн байгальд ээлтэй техник технологи ашигласан байгальд үзүүлэх нөлөөлөл нь тэр хэмжээгээрээ байгаль орчны бүрэлдэхүүн тус бүрээр өндөр үр дагавар үзүүлдэг. Үүний оронд хоёрдогч эх үүсвэрийг дахин ашиглах нь байгаль орчинд шууд үзүүлэх нөлөө харьцангуй бага байна.

# 5

## Дүгнэлт

1. Орчин үеийн олон дэвшилтээ технологи, үйлдвэрлэлд зайлшгүй шаардлагатай ГХЭ-ийн эрэлт нэмэгдэж, нийлүүлэлт хомсдоноор үнэ тасралтгүй өссөөр байна.
2. Байгаль орчин, эдийн засаг, хууль тогтоомж, худалдааны хязгаарлалт зэрэг асуудлуудаас үүдэн ГХЭ-ийн олборлолтод зарим нэгэн хязгаарлалтууд бий болсон.
3. Эдгээр асуудлуудаас хамаарч ГХЭ-ийн эрэлт хэрэгцээ байнга өсөн нэмэгдэж байгаатай холбоотойгоор ГХЭ-ийн агуулга бүхий хоёрдогч эх үүсвэрээс ГХЭ гаргаж авах судалгаа эрчимтэй хийгдэж байна.
4. Нүүрс, нүүрсний үns, төмрийн хүдэр, төмрийн хүдрийн хаягдал зэрэг хоёрдогч эх үүсвэрээс ГХЭ-ийн агуулгыг тодорхойлохын тулд Монголд нүүрс болон төмрийн хүдрийн чиглэлээр үйл ажиллагаа явуулж байгаа уурхайнуудаас дээжийг цуглуулсан.
5. Хоёрдогч эх үүсвэрээс ГХЭ гарган авах аргуудын талаар өмнө судлагдсан мэдээ, материалуудыг цуглуулж, арга аргачлалыг судалсан.
6. Судалгаанд 11 компаниас нийт 43 дээжийг авч, тэдгээрт ГХЭ-ийн агуулгыг тодорхойлсон.
7. Yr дүнгээс харахад, нийт шинжилгээнд хамруулсан дээжнээс нүүрсний дээжинд хамгийн өндөр ГХЭ-ийн агуулга тодорхойлогдсон (нийлбэр ГХЭ-ийн агуулга нь ~500 ppm).
8. Хамгийн өндөр нь “Мига Эрин” ХХК-ийн Бор Хулангийн нүүрсний уурхайн дээж – 493.79 ppm.
9. Нийт цуглуулсан дээжийн дийлэнхэд Ce, La, Y гэх элементүүд бусад ГХЭ-ээсээ өндөр агуулгатай байна.
10. Нийт дээжнээс зарим нүүрсний дээжүүд нь анхаарал татахуйц хэмжээнд байсан ч үйлдвэрийн үр ашигтай агуулга заагаагүй болно.

11. Өмнөх судалгаануудаас харахад, дээжийн ширхэглэгийн хэмжээ багасахад газрын ховор элементийн агуулга өсөж байсан нь бидний судалгааны үр дүнтэй тохирч байна.
12. Өмнөх судалгаанаас үзэхэд хүрэн нүүрсэнд газрын ховор эlement өндөр байдаг гэсэн дүгнэлт нь манай судалгааны үр дүнд мөн нотлогдож байна.
13. Үр дүнг сайжруулахын тулд судалгаанд ашигласан дээжийг уурхайгаас сонгож авахдаа тухайн ордыг төлөөлж чадахуйц илүү олон дээжийг сонгон авч, дараагийн судалгаандаа ашиглах нь зүйтэй юм.
14. Цаашдын судалгаанд ГХЭ-ийн өндөр агуулга үзүүлсэн байршилаас нэмэлтээр дээж авч нарийвчилсан шинжилгээ хийх шаардлагатай. Учир нь Монгол орон нь нүүрсний нөөцөөрөө баялаг учраас бидэнд боломж байгаа гэж харж байна.
15. Өмнөх судалгаанаас үзэхэд нүүрсний шатаах процессоос хамаарч ГХЭ-ийг баяжуулалтанд нөлөөлдөг тул шатаалтын туршилтийг хийхдээ параметрүүдийг нь өөрчилж, үнсэнд байгаа ГХЭ-ийн агуулгад хэрхэн нөлөөлж байгааг тодорхойлох шаардлагатай.

## Ашигласан ном зүй

1. Hobart M. King. Ree - rare earth elements and their uses [Internet]. geology. Available from: <https://geology.com/articles/rare-earth-elements/>
2. Gupta C, Krishnamurthy N. Extractive metallurgy of rare earths. CRC Press, (2005), 484
3. Sutherland WM, Cola EC. Comprehensive report on Rare Earth elements in Wyoming. Laramie, WY: Wyoming state geological survey; 2016
4. LePan N, Conte WBN, Graphics & Design Pernia Jamshed. Rare earth elements: Where in the world are they? [Internet]. Visual Capitalist. 2021. Available from: <https://www.visualcapitalist.com/rare-earth-elements-where-in-the-world-are-they/>
5. Geoscience Frontiers. 2019Jul;10(4):1285–303.
6. Sponsored by LSM Analytical Services Jun 19 2013. Laboratory testing of Rare earth elements (rees) [Internet]. AZoM.com. 2018. Available from: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9284>
7. Өндөр технологийн үндсэн түүхий эд нь газрын ховор элемент [Internet]. <http://erdenesmongol.mn/>. Available from: <http://erdenesmongol.mn/index.php?view=article&type=item&val=832>
8. Peiravi M, Dehghani F, Ackah L, Baharlouei A, Godbold J, Liu J, et al. A review of rare-earth elements extraction with emphasis on non-conventional sources: Coal and coal byproducts, iron ore tailings, apatite, and phosphate byproducts. Mining, Metallurgy & Exploration. 2020;38(1):1–26.
9. Carlos Ayora, Ester Torres, Francisco Macías. Recovery of rare earth elements and yttrium from passive-remediation systems of acid mine drainage. 2016;
10. Franus W, Wiatros-Motyka MM, Wdowin M. Coal fly ash as a resource for rare earth elements. Environmental Science and Pollution Research. 2015;22(12):9464–74.
11. Hermassi M, Granados M, Valderrama C, Ayora C, Cortina JL. Recovery of rare earth elements from acidic mine waters: An unknown secondary resource.

- Science of The Total Environment. 2022;810:152258.
12. Moran-Palacios H, Ortega-Fernandez F, Lopez-Castaño R, Alvarez-Cabal JV. The potential of iron ore tailings as secondary deposits of rare earths. *Applied Sciences*. 2019;9(14):2913.
  13. Koen B, Yiannis P, Peter Tom J, Tom VG, Bart B. Recovery of rare earths from industrial waste residues: A concise review.
  14. Pan J, Nie T, Vaziri Hassas B, Rezaee M, Wen Z, Zhou C. Recovery of rare earth elements from coal fly ash by integrated physical separation and acid leaching. *Chemosphere*. 2020;248:126112.
  15. Honaker RQ, Groppo J, Yoon R-H, Luttrell GH, Noble A, Herbst J. Process evaluation and flowsheet development for the recovery of rare earth elements from coal and associated byproducts. *Minerals & Metallurgical Processing*. 2017;34(3):107–15.
  16. Abaka-Wood GB, Zanin M, Addai-Mensah J, Skinner W. Recovery of rare earth elements minerals from iron oxide–silicate rich tailings – part 2: Froth flotation separation. *Minerals Engineering*. 2019;142:105888.
  17. Royen H, Fortkamp U. Rare Earth Elements - Purification, Separation and Recycling [Internet]. IVL Svenska Miljöinstitutet; 2016. (C-rapport). Available from: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ivl:diva-311>
  18. Dong Z, Mattocks JA, Deblonde GJ-P, Hu D, Jiao Y, Cotruvo JA, et al. Bridging hydrometallurgy and biochemistry: A protein-based process for recovery and separation of rare earth elements. *ACS Central Science*. 2021;7(11):1798–808.
  19. Zhang W, Noble A, Yang X, Honaker R. A comprehensive review of rare earth elements recovery from coal-related materials. *Minerals*. 2020;10(5):451.
  20. Moran-Palacios H, Ortega-Fernandez F, Lopez-Castaño R, Alvarez-Cabal JV. The potential of iron ore tailings as secondary deposits of rare earths. *Applied Sciences*. 2019;9(14):2913.
  21. Chancey RT, Stutzman P, Juenger MCG, Fowler DW. Comprehensive phase characterization of crystalline and amorphous phases of a class F fly ash. *Cement and Concrete Research*. 2010;40(1):146–56.

22. Wang Z, Dai S, Zou J, French D, Graham IT. Rare earth elements and yttrium in coal ash from the Luzhou Power Plant in Sichuan, Southwest China: Concentration, characterization and optimized extraction. International Journal of Coal Geology. 2019;203:1–14.
23. Kolker A, Scott C, Hower JC, Vazquez JA, Lopano CL, Dai S. Distribution of rare earth elements in coal combustion fly ash, determined by shrimp-rg ion microprobe. International Journal of Coal Geology. 2017;184:1–10.
24. Pan J, Hassas BV, Rezaee M, Zhou C, Pisupati SV. Recovery of rare earth elements from coal fly ash through sequential chemical roasting, water leaching, and acid leaching processes. Journal of Cleaner Production. 2021;284:124725.
25. Abaka-Wood GB, Ehrig K, Addai-Mensah J, Skinner W. Recovery of rare earth elements minerals from iron-oxide-silicate-rich tailings: Research Review. Eng. 2022;3(2):259–75.
26. Janchiv N. Coal chemistry and technology basis. 2012;2:182-189
27. Rare earth elements—critical resources for high technology: USGS fact sheet 087-02 [Internet]. Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology | USGS Fact Sheet 087-02. Available from: <https://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/>
28. Yu X-L, Bai L, Wang Q-C, Liu J, Chi M-Y, Wang Z-C. Recovery of rare earths, niobium, and thorium from the tailings of giant Bayan Obo Ore in China. Metallurgical and Materials Transactions B. 2012;43(3):485–93.
29. Itd Rand M. Rare-earth metals market research report by type, application, region - global forecast to 2027 - cumulative impact of covid-19 [Internet]. Research and Markets - Market Research Reports - Welcome. Available from: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5322966/rare-earth-metals-market-research-report-by-type>
30. Fortune business insight, Metals and Minerals, Rare Earth Elements Market, Available from: <https://www.fortunebusinessinsights.com/rare-earth-elements-market-102943>
31. NPI emission estimation technique manual for mining - dcceew.gov.au [Internet]. 1999. Available from: <https://www.dcceew.gov.au/sites/default/files/documents/mining.pdf>

32. US EPA O. AP-42: Compilation of air emissions factors. 2016 Available from: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>
33. Maiti D, Prasad B, Researchgate.net. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/295590584> Revegetation of fly ash - A review with emphasis on grass legume plantation and bioaccumulation of metals.
34. Basu M, Pande M, Bhadoria PBS, Mahapatra SC. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. *Prog Nat Sci* [Internet]. 2009;19(10):1173–86. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007109001579>





**The Study of Secondary Sources as Potential  
Repositories of Rare Earth Elements in Mongolia:  
Iron Ore Tailings, Coal, and Coal Ash**

Ulaanbaatar  
2023

**Coordinator, advisory team:** L.Altangerel (GMIT)  
N.Sandagdorj (Erdenes Mongol LLC,  
REE Research Unit)  
A.Khaumdas (Erdenes Mongol LLC,  
REE Research Unit)

---

**Implementing team of students:** V.Ankhbayar  
B.Azjargal  
B.Batbayar  
B.Batchimeg  
B.Byambakhorol  
B.Javkhlan  
B.Michidmaa  
A.Narangerel  
Ts.Oyun-Erdene  
G.Tuvshin  
T.Temuujin

---

**Editors:** GMIT-Language Center

---

**Acknowledgement:** We would like to thank the Rare Earth Elements Research Unit at "Erdenes Mongol" LLC, the Ministry of Mining and Heavy Industry, and companies who supported and cooperated during the implementation of this project module, which is an essential part of the master's study program in Resources and Technology.

# Content

<b>Abstract</b>	<b>8</b>	
<b>Background</b>	<b>9</b>	
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>10</b>
1.1	Rare earth elements	10
1.2	Applications of rare earth elements and demand	11
1.3	World rare earth elements: abundance, deposits, and resources	13
1.4	Rare earth elements: geology and mineralogy	14
1.5	Research and overview information on rare earth elements in Mongolia	15
1.6	Rare earth elements from secondary sources	16
1.7	Physical extraction methods of rare earth elements from secondary sources	19
1.8	Extraction of rare earth elements from secondary sources using chemical methods	21
1.9	Main schemes of recovery rare earth elements from secondary sources	22
1.10	New method for extraction and separation of rare earth elements from low-grade sources uses a bacterial protein	23
1.11	Summary of the extraction methods of rare earth elements from iron ore-related sources	24
1.12	Summary of the extraction methods of REEs from coal ash	27

<b>2</b>	<b>Methodology</b>	<b>30</b>
2.1	Results	31
2.2	REE content in coal and coal products	34
2.3	REE content from iron mines	39
<b>3</b>	<b>Supply and Demand for REEs</b>	<b>42</b>
3.1	REE Production	42
3.2	REE Market Size	43
<b>4</b>	<b>REE Extraction: Environmental Concerns</b>	<b>45</b>
4.1	Adverse environmental impact	45
4.2	Other impacts of REE extraction	47
<b>5</b>	<b>Summary</b>	<b>48</b>
	<b>References</b>	<b>50</b>

## List of abbreviation

REE - Rare Earth Elements  
AMD - Acid Mine Drainage

## List of tables

Table 1.	Project timeline overview	9
Table 2.	Comparison of physical and chemical properties of REE	11
Table 3.	The rare earth elements usage	12
Table 4.	REE Mine Production Abundance in the Earth's Crust: 2020	13
Table 5.	Summary of the results of different methods of extracting REE from the iron tail and apatite ore	24
Table 6.	Results of different experiments conducted on fly ash samples	27
Table 7.	Results of different experiments conducted on fly ash samples	28
Table 8.	Samples collected from locations in Mongolia	30
Table 9.	Total REE contents of collected all samples	31
Table 10.	Average price of selected rare earth oxides from 2015 to 2021(in U.S. D per kilogram)	44
Table 11.	Technological steps of pre-treatment of coal ash extraction	46

# List of figures

---

Figure 1.	Team approach to research project	9
Figure 2.	Rare earth elements - Mendeleev periodic system	10
Figure 3.	World REE's production and reserves	14
Figure 4.	Opportunities for rare earth elements in Mongolia 2022	15
Figure 5.	Total REE content, distribution, and mass yield in particle size fraction	19
Figure 6.	Total REE content, distribution, and mass yield in different magnetic fractions	20
Figure 7.	The main chemical process of REEs from coal fly ash	22
Figure 8.	The main chemical process of REEs from AMD	22
Figure 9.	The main chemical process of REEs from iron tailing	22
Figure 10.	New method of REEs from low-grade sources	23
Figure 11.	Possible iron ore tailing enrichment flowsheets to be considered	26
Figure 12.	Possible ash enrichment flowsheets	29
Figure 13.	Location of the collected samples	31
Figure 14.	Samples with the highest content total REEs	33
Figure 15.	REE content distribution in the samples of Baganuur coal mining	34
Figure 16.	REE content distribution in the samples of Shivee-Ovoo coal mining	35
Figure 17.	REE content distribution in the samples of Sharin Gol coal mining	35

Figure 18. REE content distribution in the samples of Bor Khulan coal mining	36
Figure 19. REE content distribution in the samples of Aduunchuluun coal mining.	36
Figure 20. REE content distribution in the samples of Energy Resource coal process plant	37
Figure 21. REE content distribution in the samples of thermal power plant-4- fly ash	37
Figure 22. REE content distribution in the samples of Dornod thermal power plant- ash	38
Figure 23. REE distribution in the sample from Tumurtei iron processing plant	39
Figure 24. REE distribution in the sample from Bargilt iron processing plant	40
Figure 25. REE distribution in the sample from Elstei iron ore mining	40
Figure 26. Global production of REO, 1950-2000	43
Figure 27. Global RE metals market	43
Figure 28. Coal ash and coal stockpile condition at Thermal Power Plant-4	46

## Abstract

---

Master's students of German-Mongolian Institute for Resources and Technology conducted this research project jointly with the Rare Earth Elements Research Unit at Erdenes Mongol LLC, in partial fulfilment of their required Advanced Research Project. The main purpose of this research was to determine the content of rare earth elements from coal mining ash, from iron ore mining tailings, and from thermal power plants, as possible secondary sources for rare earth elements. We collected 43 samples from 6 coal mines, 3 iron ore mines, and from the ashes of 2 thermal

power plants in Mongolia. Chemical tests were conducted on the samples collected, in order to determine the content of rare earth elements. Results from the chemical analysis revealed the presence of: Ce, La, Nd, and Y elements in the coal and coal products samples; Ce, La, Nd Sc, and Y in the iron deposits; and Ce, Gd, La, Nd, and Y in the thermal power plant's fly ash samples. In the next phase of the research project, plans are to conduct additional hydrometallurgical experiments on the high REEs-containing samples.

---

**Keywords:** - rare earth elements, flotation, magnetic fraction, fly ash, alkaline and acid leaching, roasting, physical separation, ion extraction

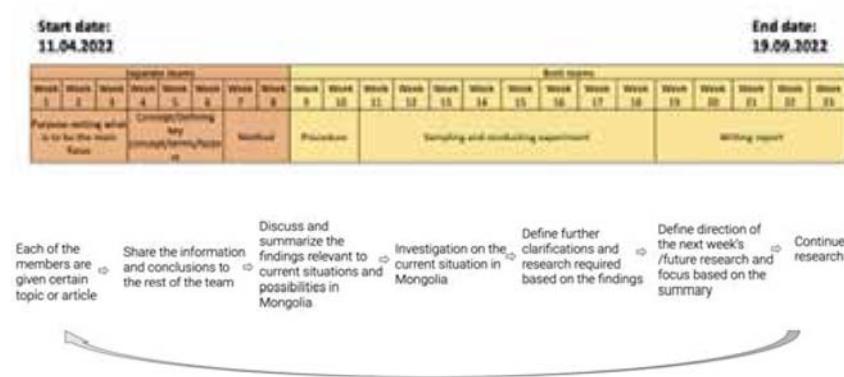
# Background

Preparatory part and overall, of the advanced research project continued for 23 weeks in total. Project timeline overview is shown as Table 1. Depending on the direction of the main focus each week, different contents of peer reviewed scientific articles were searched from the internet and chosen to be read by each of the members in the team.

As there can be many types of articles depending on the content and the purpose, it was required for the members to fill in article key notes template for every week to orderly gather the relevant findings and also to efficiently provide the rest of the team with fundamental information of their individual findings. Main goals of each different week and all of the article's names that have been read by the team is provided. The team members were initially assigned to write individual summaries on the findings

for each different week for the report of the project. Due to that problem, each of the members were assigned to focus on different topics that were relevant to the main topic of the project and write summary review on their findings and report it. It should be noted that the main focus of the research was directed to topics of REE containing fly ash and iron related secondary sources due to higher probabilities of source and sample availability considering the situation in Mongolia. After the preparatory stage, 2 teams were united and did research together. Based on preparatory research results, samples are collected from several possible secondary resources and chemical analysis was performed in the collected samples. In the last 5 weeks, all team members contributed to writing the report.

**Table 1.** Project timeline overview



**Figure 1.** Team approach to the research project

# 1

## Introduction

### 1.1 Rare earth elements

Rare earth elements (REE) are a group of seventeen metallic elements. However, these elements contain the fifteen lanthanides on the periodic table, plus scandium and yttrium, which are similar physical and chemical properties

that occur within the periodic table (Figure 2) [1]. In general, the range characteristic of REE density is 4.48g/cm<sup>3</sup> - 9.33g/cm<sup>3</sup>, and the heating temperature is 804°C-1550°C.

The figure shows a modified Mendeleev periodic table focusing on the rare earth elements (REEs). The table is divided into two main groups: Heavy Rare Earth Elements (HREEs) and Light Rare Earth Elements (LREEs). The HREEs are located in the second column of the lanthanide series, while the LREEs are in the first column. The table includes the following groups:

- Period 2:** He
- Period 3:** Li, Be
- Period 4:** Na, Mg
- Period 5:** K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr
- Period 6:** Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe
- Period 7:** Cs, Ba, La, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn
- Period 8:** Fr, Ra, Ac, Rf, Db, Sg, Bh, Hs, Mt

**Lanthanides:** La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu

**Actinides:** Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr

Figure 2. Rare earth elements - Mendeleev periodic system [1]

Rare earth elements are divided into two groups; the first group contains heavy elements, and the second group contains light elements.

**Table 2.** Comparison of physical and chemical properties of REE [2]

Element	Symbol	Atomic number	Atomic mass	Density g/cm3	Melting point °C	Vicker's hardness	Appearance	Oxidation state	Molar heat capacity J/(mol·K)
Lanthanum	La	57	138.9	6.146	918	37	Colorless	3	26.2
Cerium	Ce	58	140.1	8.16	798	24	Colorless	3 and 4	27.0
Praseodymium	Pr	59	140.9	6.773	931	37	Yellow green	3 and 4	27.0
Neodymium	Nd	60	144.2	7.008	1021	35	Red violet	3	27.5
Promethium	Pm	61	145.0	7.264	1042	-	Pink	3	24.3
Samarium	Sm	62	150.3	7.52	1074	45	Yellow	2 and 3	29.6
Europium	Eu	63	151.9	5.244	822	17	Colorless	2 and 3	27.7
Gadolinium	Gd	64	157.2	7.901	1313	57	Colorless	3	37.1
Terbium	Tb	65	158.9	8.23	1356	46	Pale pink	3 and 4	28.9
Dysprosium	Dy	66	162.5	8.551	1412	42	Pale yellow green	3	28.2
Holmium	Ho	67	164.9	8.795	1474	42	Yellow	3	27.2
Erbium	Er	68	167.2	9.066	1529	44	Pink	3	28.1
Thulium	Tm	69	168.9	9.321	1545	48	Pale green	2 and 3	27.0
Ytterbium	Yb	70	173.0	6.966	819	21	Colorless	2 and 3	26.7
Lutetium	Lu	71	174.9	9.841	1663	77	Colorless	3	26.9
Yttrium	Yb	39	88.9	4.469	1522	38	-	3	25.5
Scandium	Sc	21	44.9	2.989	1541	85	-	2	26.5

## 1.2 Applications of REE and demand

The uses, applications, and demand for rare-earth elements has expanded over the years. Globally, most REEs are used for catalysts and magnets. In the USA, more than half of REEs are used for catalysts; other major uses are for

ceramics, glass and polishing.

In addition, REEs are used for the production of high-performance magnets, alloys, and electronics. Ce and La are important as catalysts, and are used for petroleum refining and as diesel

additives. Nd is important in magnet production in traditional and low-carbon technologies. REEs in this category are used in the electric motors of hybrid and electric vehicles, generators in wind turbines, hard disc drives, portable electronics, microphones, and speakers.

Ce, La and Nd are important in making alloys, and in the production of fuel cells and nickel-metal hydride batteries. Ce,

Ga and Nd are important in electronics and are used in the production of LCD and plasma screens, fibre optics, lasers, as well as in medical imaging. Additional uses for REEs are as tracers in medical applications, fertilizers, and in water treatment. REEs have a variety of commercial uses for each element described in Table 3.

**Table 3.** The rare earth elements usage [3]

Element	Typical uses	Element group
Lanthanum	Lanthanum oxide additive in optical lenses increase light refraction, the catalyst is heavy crude oil reformation, lighting phosphors, batteries, metal alloys, polishing compound, ceramics	Light rare earth element
Cerium	Polishing compound for optical lenses, lighting phosphors, batteries, metal alloys, ceramics, glass additives	
Praseodymium	High-power permanent magnets, batteries, metal alloys, catalysts, polishing compounds, glass additives, ceramics	
Neodymium	The catalyst is heavy crude oil reformation, high-power permanent magnets, neodymium-yttrium-aluminium-garnet lasers, neodymium iron-boron permanent magnets, batteries, metal alloys, ceramics, glass additives	
Samarium	Samarium-cobalt permanent magnets, batteries	
Europium	Phosphor activator for the red colour in a colour television tube	Heavy rare earth element
Gadolinium	High-power permanent magnets, paint or coating against neutron radiation, phosphors	
Terbium	Terbium iron -nickel alloy with dysprosium (Terfenol-D) used in stealth technology, lighting phosphors, high-power permanent magnets	
Dysprosium	High-power permanent magnets, ceramics, nanotechnology research	
Holmium	High-power permanent magnets, nuclear control rods, lasers, optical coatings	
Erbium	Doped fibre laser amplifiers, metal alloys	
Thulium	Few uses due to rarity and properties similar to other REEs	
Ytterbium	Radiation source in portable X-ray equipment, stress gauges, lasers, metal alloys, catalyst	
Lutetium	Few uses due to rarity and properties similar to other REEs	
Scandium	High-strength light weight metallurgical applications	Associated
Yttrium	Neodymium-yttrium-aluminium-garnet lasers, lighting phosphorus	

## 1.3 World REE: abundance, deposits, and resources

The major known REE deposits occur in China and America, with much smaller reserves found in India, Brazil, Malaysia, and South Africa. Production has been dominated by China, with additional production from Australia, India, Malaysia, Russia, and Thailand. But China's reserves of REEs are the largest, accounting for 38 percent of the world's resources. Approximately 33 percent is in the United States, 12 percent in Australia, and five percent in Malaysia and in India. Other countries including Brazil, Canada, South Africa, Sri Lanka, and Thailand made up the

remainder. However, in 2008, China accounted for more than 90 percent of the world's processing of REEs, and by 2011, China accounted for 97 percent of world production. Beginning in 1990, the Chinese government-imposed restrictions on the extraction and export of REEs. Work has also begun to limit the number of Chinese and foreign joint ventures; this has led to an increase in the price of REEs on the world market. With 44 million tons of reserves and 140,000 tons of yearly mine production, China tops the list for REE mine production and reserves. Despite the fact that Vietnam

**Table 4.** REE Mine Production Abundance in the Earth's Crust: 2020

Abundance in the Earth's crust				Mine production		
Nº	Country	reserves in tons/ per year	reserves in perc/ per year	Country	in tons/ per year	in perc/ per year
1	China	44,000,000	37.99%	China	140,000.00	57.54%
2	Vietnam	22,000,000	18.99%	U.S.	38,000.00	15.62%
3	Brazil	21,000,000	18.13%	Myanmar	30,000.00	12.33%
4	Russia	12,000,000	10.36%	Australia	17,000.00	6.99%
5	India	6,900,000	5.96%	Madagascar	8,000.00	3.29%
6	Australia	4,100,000	3.54%	India	3,000.00	1.23%
7	U.S.	1,500,000	1.30%	Russia	2,700.00	1.11%
8	Greenland	1,500,000	1.30%	Thailand	2,000.00	0.82%
9	Tanzania	890,000	0.77%	Vietnam	1,000.00	0.41%
10	Canada	830,000	0.72%	Brazil	1,000.00	0.41%
11	South Africa	790,000	0.68%	Burundi	500.00	0.21%
12	Other Countries	310,000	0.27%	Other	100.00	0.04%
	Total	115,820,000	100.00%	Total	243,300.00	100.00%

and Brazil have the second and third largest reserves of rare-earth metals, with 22 million tons and 21 million tons, respectively, their mine production is among the lowest of all countries, at only 1,000 tons per year [4].

As an example, at 68 parts per million, cerium is the 25th most abundant element in the earth's crust.

The planet's crust has a large number of rare earth elements. As a result, it is just as common as copper [5]. Because of their geochemical properties, REEs are frequently distributed. This means that they are not found in thick enough clusters to be worth mining very often. These minerals are known as rare earths because of their scarcity [6].



Figure 3. World REE's production and reserves

## 1.4 REEs: geology and mineralogy

Knowing the diversity of REEs is very helpful in exploration; For example, economically viable and usable concentrations are usually extracted from crystalline rocks. REEs are more common in alkaline igneous rocks and carbonates than in mafic rocks. Critical elements typically occur as trivalent cations -rock-forming minerals in carbonates, oxides, phosphates, and silicates. REEs are chemically similar to thorium and are commonly found

in deposits and minerals in this type of element. REEs occur in a variety of rock units across Wyoming. Reported Precambrian REE occurrences are hosted by pegmatites, veins and dikes, faults and fracture zones, metal carbonate rocks, disseminated minerals in generally alkalic igneous rocks, and in met sediments. Sedimentary occurrences in paleo-placers are found primarily in the Cambrian Flathead Sandstone and the Cretaceous Mesa Verde Formation, as

well as local, slighter deposits in many units. Disseminations of REEs are also reported in the phosphate-rich rock of the Permian Phosphoric Formation. Tertiary-aged hosts include alkaline igneous rocks, carbonatite veins, dikes, hydrothermal zones, and apparent depositions from solution movement within sandstone. Quaternary REE hosts can be found in alluvial-placers and paleo-placers [5]. Many minerals are known to contain REEs as essential

constituents, and a greater number contain REEs as accessory elements. Only a few of these minerals host large enough concentrations of REEs to be considered ore minerals. Alunite and monazite occur as relatively common accessory minerals within many types of felsic igneous rocks. Globally, the principal commercial sources of REEs are the minerals bastnaesite, loparite, monazite, and xenotime, and rare earth ion-adsorption clays.

## 1.5 Research and overview information on REEs in Mongolia



Figure 4. Opportunities for mining REEs in Mongolia 2022 [7]

Although no comprehensive geological investigation of REEs has been carried out in Mongolia, locations rich in REEs have been found in Khanbogd, Khalzanburegtei, Lugiin Gol, Mushgia Khudag, Khotgor, and Ar Gol. There have been four deposits discovered, as well

as 71 occurrences and approximately 260 mineralized sites. State budget and private money is now being used to explore the Mushgia Khudag, Khotgor, Lugiin Gol, and Khalzanburegtei deposits in Mongolia for REEs, and a total of 3 million tons of oxide reserves have been

discovered. Despite the fact that reserves have been identified, no deposits have yet been exploited and put to profitable use [8]. The demand for REEs has been rising as a result of their increasing use in modern technologies. As REE ore reserves become depleted around the world, new sources and methods for extracting REEs have piqued global interest. Mushgia Khudag, Khotgor and

Lugiin gol deposits in the Gobi region are dominated by light REEs, while Khalzanburegtei, Ulaan Del, Shar Tolgoi deposits in around the Khovd province zone are dominated by heavy REEs. Independent major minerals in REEs include carbonate-type (bastnaesite) and phosphate-type (monazite and xenotime). But there are no independent mineral deposits in our country.

## 1.6 REEs from secondary sources

The growth of REEs usage in modern technological society has increased global demand. Additionally, China's monopolistic control over the market, has led to a decrease in supply. Due to environmental concerns regarding conventional mining of REEs, and a constantly growing demand, an increased interest has arisen in research that focuses on finding promising, secondary sources containing REEs. Perhaps our study will stimulate other countries to stimulate develop their own REE industry as we are. Current concerns about the lack of diversity in the supply of REEs have spurred new research into utilizing domestic sources, especially

from secondary sources such as acid mine drainage (AMD), coal, coal by-products (coal fly ash), iron ore tailings, apatite, pyrometallurgical slag, bauxite residue (red mud), phosphor-gypsum, phosphate by-products and wastes (e.g., electronics, lighting). REE extraction methods include physical separation, in addition to hydrometallurgical and bio-hydrometallurgical techniques. The application of those REE extraction techniques for enhanced recovery has been driven primarily by the unique industrial applications of those important elements [9,10].

### Coal Ash

The world continues to produce vast quantities of coal ash. During coal combustion, large amounts of ash are created, together with carbon dioxide and other gasses. The fine particle ash that rises up with the flue gasses is

called fly or flue ash, while the heavier ash that does not rise is termed bottom ash; collectively these are referred to as coal ash.

Half of fly ash is beneficially reused, primarily in construction materials. The

rest is stored, mostly in landfills and impoundments. Coal fly ash is a decent source of critical elements like Ge, and U, including REEs. This ash is investigated for REE recovery by  $H_2SO_4$  leaching,  $HNO_3$  leaching, multistage resin-in-leach, and electro-dialytic reversal (EDR) with recovery rates as high as 70% REE in EDR. Minerals identified in the coal fly ash were mullite ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), calcite ( $CaCO_3$ ), quartz ( $SiO_2$ ), and hematite ( $Fe_2O_3$ ). Studies have suggested that REEs are often extracted in their ionic form because they are easily hydrolyzed.

Kertis and Yudowich (2009) estimated

that coal fly ash contains 445 ppm of REEs on an average global basis. The REE extraction process from fly ash is much less intensive than that of mining a raw product. Additionally, coal fly ash contains a full range of REEs, whereas most mines have only some kinds of these elements. Because of this, many companies are exploring methods to extract REEs from coal fly ash and investigating whether coal fly ash processing can become an economical and environmentally friendly alternative to traditional mining [10].

## Acid mine drainage (AMD)

AMD poses severe environmental pollution problems because of its high acidity, sulphate content and toxic metals. AMD continues to be considered one of the greatest mining sustainability challenges because of the massive volume of waste generated and therefore, the associated high cost of treatment. The most common method to treat AMD is by neutralization with alkaline reagents such as sodium carbonate, limestone, lime, or ammonia, which generates large volumes of sludge. Current REE recovery methods to tackle the problem are inadequate, and those that work are costly. Therefore, this serves as a motivation to develop new techniques that are both economical

and sustainable and solves the unwanted consequences that damage the environment. REE separation from AMD: a) Preliminary stage of removal of Fe from AMD-containing REEs using  $CaO$ ,  $MgO$  or  $NaOH$ ; b) Second stage where the Fe-free treated AMD containing REEs, are concentrated using an IX resin, containing a sulfonic group; and c) a selective precipitation stage using phosphate salts at a fixed pH to recover REEs as phosphates [11]. Extraction of REEs from AMD is helpful to REE recovery (high recovery) and chemical consumption (low chemical consumption), but it contains a lower grade of REE (low grade in large volume).

## Iron ore, tailings

Iron ore deposit tailings' REE concentration depends on the generation process and type of ore

deposit. If the process is flotation, REE concentration in the tailing is low (for reference - around 20ppm TREE). REE

concentrations in tailings undergoing a roasting and magnetic separation process are higher (for reference - around 400ppm TREE which is close to iron ore TREE concentration). The main minerals are bastnasite, monazite, xenotime, apatite, gadolinite, and zircon. Approximately 95% of REEs are found

in the first three minerals. The recovery of REEs from iron tailings can be economically feasible if the need for a material as well as its strategic viability allows novel techniques to emerge. If these techniques focus on the recovery of a particular element, extraction would be profitable [12].

## Phosphate by-products

The presence of REEs has been recognized in several phosphate secondary sources including phosphoric acid, phosphate tailings and phosphate fertilizer by-products. The extraction

of REEs from such sources has been explored and demonstrates the viability of reliable REE production from such sources [13].

## Metallurgical slag

The employed metallurgical flow sheets have not yet been developed for recovery of REEs from pyrometallurgical slag of the Waste Electrical and Electronic Waste (WEEE) smelting

process. Because of the high affinity of the REEs for oxygen, the REEs end up in diluted (oxidic) form in the slag of the so-called "copper smelter" and eventually in the slag of the lead blast furnace [13].

## Bauxite residue (red mud)

Bauxite is digested in a hot sodium hydroxide solution. The solution is clarified by filtering off the solid impurities, which form the so-called bauxite residue or red mud. The composition of red mud depends on the type of bauxite, the mining location, and therefore the process parameters of the Bayer process

[13]. Red mud poses a significant and hazardous problem. There are numerous studies on the extraction of rare earths and of scandium from red mud. The two main approaches are either purely hydrometallurgical processes or a combination of pyrometallurgical and hydrometallurgical processes.

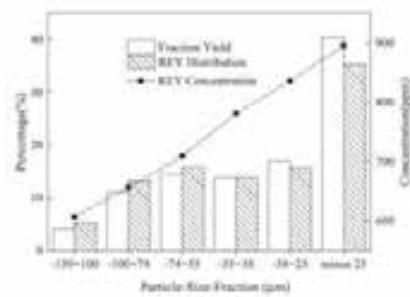
## 1.7 Physical extraction methods of rare earth elements from secondary sources

We have several secondary sources of REEs including coal fly ash, acid mine drainage, and its sludge, and tailings from iron mining. Each ore or source has individual physical and chemical properties. Therefore, there is no well-known process for recovering the REEs from secondary sources. However, there are several chemical and physical processes for enrichment. In the chemical process, leaching and ion exchange methods are well-known. In the physical separation method, REEs could be enriched or separated by screening, magnetic separation, density separation, and froth flotation. The appropriate process selected to obtain the optimum combination to recover REEs from secondary sources.

### Fly ash:

Coal fly ash is a by-product of power plants. Throughout the world, all power plants dispose of large amounts of ash and then landfill or accumulate the ash. Coal fly ash contains higher REE concentrations than that of the original coal, as the carbon content burns during the combustion processes; thereby increasing the REY concentration about 8-10 fold [14]. As a result, coal fly ash could be a promising secondary source. Even though coal fly ash has a favourable grade of REE, it should be

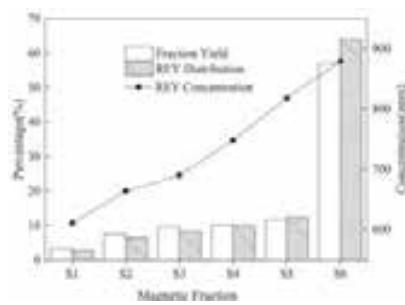
treated by physical separation methods. Several experiments have been made on coal fly ash for enriching REEs, using screening, magnetic separation, and density separation methods. Screening is the most common physical method, usually used in the mining sector. The following graph shows the results of screening analysis on coal fly ash.



**Figure 5.** Total REE content, distribution and mass yield in particle size fraction [14]

The above graph shows that REE content increased from around 600 to 900 ppm with decreasing particle size, and the highest RER grade was measured at the -25 mm size fraction. The distribution of individual REE elements showed the same trend as the total REEs. Therefore, particle size separation can be utilized for REY recovery and to segregate the high REY content fractions [14]. The magnetic separation method can also be used to recover REEs from secondary

sources, especially from coal fly ash. The following graph shows the experimental results of magnetic separation on coal fly ash. The magnetic susceptibility of the particles decreased from S1 to S6.



**Figure 6.** Total REY content, distribution, and mass yield in different magnetic fractions [14]

As illustrated in the graph, the concentration of the REEs increased from approximately 600 to 900 ppm. The trend indicates that the REE content increased with decreasing magnetic susceptibility. The non-magnetic fraction had the highest mass yield (i.e., 57%) and 64% of REEs occurred in this fraction. Another significant finding was a very high concentration of iron content (nearly 60%) in the S1 fraction [14]. Moreover, another rare-earth project found that removal of the iron-based minerals prior to leaching, substantially reduced acid consumption and overall processing cost [15]. Another physical separation method is density separation. In this experiment, REEs were expected to be found in a high-density fraction, yet REEs were found trapped in middle-density fractions and distributed evenly. Thus, density separation is not as efficient as the screening and magnetic separation methods.

#### Iron ore tailings:

In iron ore tailings, magnetic separation and froth flotation methods are tested. The magnetic separation method cannot separate REEs from the iron ore tailing source. This is because, with increasing the magnetic field intensity, the grade of REE, iron, and silica increases. In later processes, iron and silica have diverse effects. Furthermore, a froth flotation test was performed after magnetic separation. The maximum result from “rougher-cleaner hydroxamic acid flotation was 80% REE recovery at a 1.16 enrichment ratio, with 17% Fe and 62% Si removed” [16].

#### Acid Mine Drainage:

In the acid mine drainage solution, REEs are leached and extracted into ions. It is possible to enrich or extract the REEs by the processes of solvent extraction, ion exchange, and precipitation. These processes are more related to the chemical extraction section.

To sum up the physical separation section, physical separation can be used to enrich or separate the REEs prior to the leaching or flotation processes. For the coal ash, it is useful to use a combination of screening and magnetic separation to increase the concentration prior to the main extraction process. Moreover, coal ash is a more promising secondary source compared to iron ore tailings and AMD solution or sludge. For the iron ore tailings it is hard to increase the concentration of the REEs by using the density or magnetic separation method prior to the froth flotation. And iron ore tailings contain a lot of silica and

iron, which could lead to the high cost of using reagents and the inefficiency of the main extraction process. Enrichment or extraction of REEs from AMD is related

to the chemical extraction processes and its detailed information is written in the section of chemical extraction.

## 1.8 Extraction of REEs from secondary sources using chemical methods

Low-grade sources of REEs, for example coal fly ash, typically contain many REEs and other metals mixed in. Common processes for the recovery of REEs from secondary sources include chemical precipitation, coagulation, flocculation, flotation, ion exchange, adsorption, and electrochemical processes [17].

Hydrometallurgy is a well-developed process for the extraction of REEs from REE-carrying substances such as natural ores and other secondary sources. It includes two stages: leaching and separation [18].

REEs need to be in ionic (an aqueous solution) form to be extracted from their associated minerals. Leaching is the chemical process used to release REEs from the REE-bearing rocks and minerals. Some techniques used for REE leaching from common resources are:

### Sulfuric acid baking and leaching, also called concentrated sulfuric acid leaching:

This method is performed in the

temperature range of 200 to 500°C. Sulfuric acid produces sulphide oxide gasses during the process

### Roasting - a hydrochloric acid leaching:

A hydrochloric acid leach process is optimized under roasting conditions using  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; slag weight ratio of 3:7 at 850°C- 900°C for 1 hour.

### Caustic soda leaching:

Caustic soda leaching is carried out in the temperature range of 120 to 130°C [19].

Then, different separation processes are used to recover REEs from the aqueous solution. The recovery of REEs from secondary sources, or from the aqueous solution obtained during hydrometallurgy, is generally performed using common methods such as:

- precipitation
- electrocoagulation,
- flotation
- solvent extraction (SE)
- ion exchange
- adsorption

The ion exchange process produces large amounts of waste solutions which may be acidic or basic, and which contain displaced cations and complexing agents. In the solvent extraction process, all spent solids leave the process as wastes.

## 1.9 Main schemes of recovery REEs from secondary sources

REEs from coal fly ash using acid leaching, solvent extraction, and acid regenerated in the stripping step, which reduces the chemical cost.



Figure 7. Main chemical processes of REEs from coal fly ash

REEs from acid mine drainage is the second main resource. The recovery methods can be classified as precipitation, adsorption, diffusion dialysis, and ion-exchange.



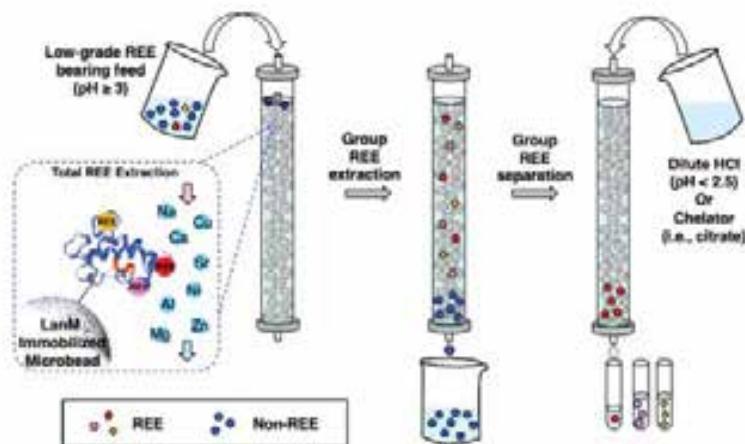
Figure 8. Main chemical processes of REEs from AMD

Total REE concentration in iron tailings is normally less than coal and coal refuse. Before the leaching process, the concentration of REEs is increased by the flotation process.



Figure 9. Main chemical process of REEs from iron tailing

## 1.10 New method for extraction and separation of REEs from low-grade sources uses a bacterial protein



**Figure 10.** A new method of REE extraction from low-grade sources

The new method relies on a protein called lanmodulin (LanM) that first binds to all the REEs in the source. Then, other metals are drained and removed. By changing the conditions of the sample, for example by changing the acidity or adding ingredients called chelators, individual types of REEs become unbound and can be collected. Even

when a sample has very low amounts of REEs, this new procedure successfully extracts and separates heavy REEs with high purity [20].

The researchers plan to optimize the method so that fewer cycles are required to obtain the highest-purity products, and so it can be scaled up for industrial use.

## 1.11 Summary of the extraction methods of REEs from iron ore related sources

There have been various extraction methods conducted on iron-related secondary sources. In order to give a comprehensive review of the results of those methods, a few articles with concise content on the topic were reviewed, in order to gather the results of different experiments on different types of samples. At the same time, the aim was to have a more generalised understanding from the results of others' experiments, on similar types of secondary sources. Based on the evaluation of those findings, it was

concluded that these sources could provide useful direction in the future work of this project.

One of the topics that is worth studying and understanding, is how iron mineral processing itself affects the enrichment of REEs in its tailings or concentrate. Iron ore samples and its tailings from the different processes such as flotation, magnetic separation and roasting were collected and studied to evaluate the enrichment of REEs. The outcomes indicated that tailings from the flotation process did not result in

**Table 5.** Summary of the results of different methods of extracting REEs from iron tailings and apatite ore [8]

Material Classification	Source Type	Procedure and Methods	Conditions and Additives	Results
Iron tailings	Iron ore tailing	Magnetic-Flotation	collector: sodium oleate, sodium silicadepressant	Enrichment ratio 1.6-1.8
	Non-Magnetic floatation			
	Iron tailing (Rich in silica)	Knelson and shaking table	-	No upgrade was observed when the particle size was less than 74 mm
	Iron ore tailing	Roasting	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 700C and 2 M HNO <sub>3</sub>	reached good recovery in REEs
REE-bearing ore	REE-bearing ore	Gravity and Magnetic Separation	-	Successfully rejected nonmagnetic gangue minerals
Apatite ore	Apatite magnetite ore	Precipitation Stripping	Tributyl phosphate from nitric acid leaching	Viable alternative to traditional acid leaching
	Apatite ore	Flotation	Sodium oleate	90% recovery
	Apatite ore	Leaching agent	Nitric acid	Good recovery and yield
	Apatite concentrate	Acidity level, leaching time, agitation rate, temperature and particle size	Acidic 60%, solids 30%, Leaching time 30min, Agitation rate 200rpm, Temperature 60°C	Recovery of some REEs were from 59-74%

any enrichment. In fact, the opposite was found; this process resulted in the depletion of REE content. However, magnetic separation and the roasting process had a higher influence of enrichment of REEs. This also indicates that sources that have been pre-concentrated have the potential of being a strategic reserve for REEs [21].

There were several studies and process methods conducted on iron tailings samples and on apatite ore, which is one of the types of mineral compounds that contain higher content of REEs. A summary of the results is shown in Table 5.

From the results of different extraction methods conducted on iron-related sources:

- For the various separation methods, the flotation process gave consistent upgrading of the results, with better recoveries compared to the other methods. The main collector and depressants were sodium oleate and sodium silica.
- Gravity, magnetic and electrostatic help to reject the gangues from the REE mineral-bearing materials, but at lower yields.
- Hydrometallurgical methods of extracting REEs from iron-related ore or tailings, and apatite, were found to be efficient in many cases with different types of acids.

• Combinations of different methods are usually used to enhance the results.

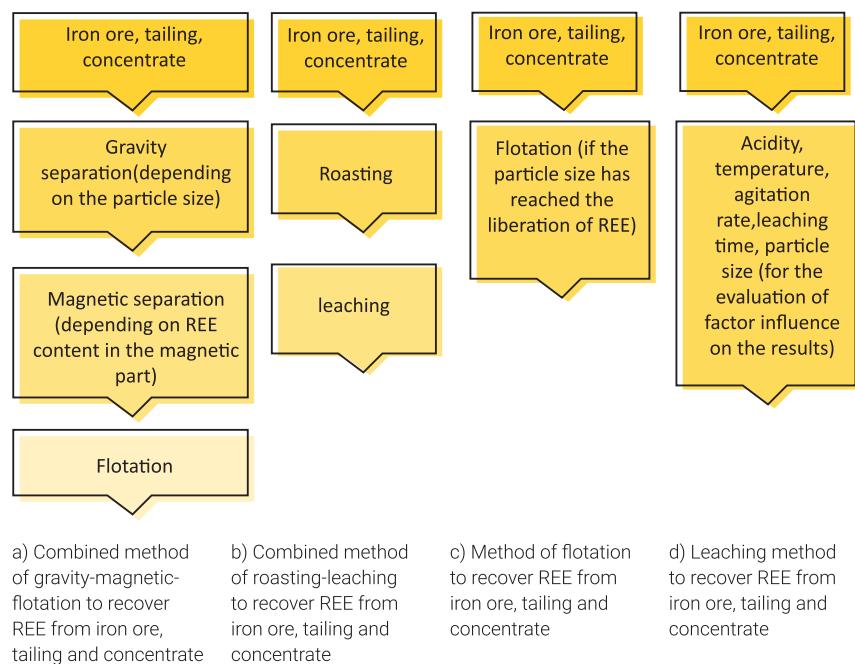
• More research should be conducted on the roasting method on iron tailings, as it was found to bring good results in the recovery.

• There was no enrichment in REEs in the tailings of iron ore flotation, while tailings in the magnetic separation process indicated some enrichment.

Based on those findings, Figure 1 is rough process' flowsheet that might be considered as feasible experimental options, should our samples contain promising REE grades. It should be noted that these flowsheets are proposed on the basis of findings that were focused on understanding the properties of REEs containing iron-related sources, and the different types of experimental results from them, with the purpose of extracting the REEs in Figure 11.

Recommended analysis of the REEs containing iron-related secondary source samples, to evaluate suitable process methods

1. Chemical analysis (ICP REE)
2. Mineral analysis (Mineralogy)
3. Size fraction (Screening)
4. REE content in different particle size distribution
5. REE content in magnetic and non-magnetic parts



**Figure 11.** Possible iron ore tailing enrichment flowsheets to be considered

## 1.12 Summary of the extraction methods of REEs from coal ash

Compared to studies on the properties and extraction methods of REEs from iron-containing secondary sources, there were more results published on the topic of coal ash, since there have been and still are many ongoing studies worldwide. Based on the findings of the previous research, that focused on understanding properties of fly ash, the following key points were made:

- Fly ash contains two main phases which are referred to as the crystalline phase and the amorphous phase [21]. Amorphous phases are about 60-90% and the rest usually are in the crystalline phase.
- The crystalline phase mainly includes quartz, mullite, hematite, magnetite, ferrite spinels, anhydrite,

melilite, merwinite, periclase, tricalcium aluminate, and lime.

- The differences found in the coal ash samples, and their characteristics, are highly dependent on the origin of the coal [22].
- The coal ash samples are in the form of nanoscale crystalline, corresponding to overlapping ultra-fine minerals that are atomically dispersed in the fly ash glass [23].
- The minerals that contain REEs were found to be less in the ash than in the original coal, even though the REE content in the ash is enriched [23].
- REEs are partitioned into aluminosilicate glasses formed at boiler temperatures [24].

**Table 6.** Results of physical separation on different experiments conducted on fly ash samples

Source Type	Procedure and methods	Results
Fly ash samples	Density separation	The hypothesis that REE would be enriched in heavier fractions was rejected RE minerals are incorporated with other lower-density minerals and dispersed inside fly ash particles.
		This might make density separation inefficient.
		Density-based separators were the least effective methods due to ultrafine grain size of Re minerals
	Density fraction test	2.71-2.95 SG and 2.45-2.71 SG
	Magnetic separation	REE content increases as the magnetic properties decreases
	Distribution of REEs in coal combustion fly ash	REE in the glass phase, the most abundant constituent of coal fly ash should be targeted for extraction and concentration. Strong correlation with Al, Si
	Acid leaching	chemical and thermal pre-treatment would result better extraction performance for acid leaching

**Table 7.** Results of leaching experiments conducted on both fly and bottom ash samples [25]

Sample	Source	Pre-treatment	Lixiviant	Leaching Conditions	Results
Bottom ash	laboratory prepared	none	HCl, HF, HNO <sub>3</sub>		35-90% recovery (Ce, Nd, Y)
Fly ash	China, South Korea, United States	none	HCl, HF, HNO <sub>3</sub>	Different pulp density, temperature time	Results in recovery range from 32-90% (not consistent result)
		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 1/1 solid-liquid ratio 860%	HCl, HNO <sub>3</sub>		Relatively better and consistent results (70-90%)
		40% NaOH, 10/1 solid-liquid ratio, 150, 2h	HCl, HNO <sub>3</sub>		

Tables 6 and 7 are shown, to provide a summary of the results of different extraction methods conducted on coal ash samples.

Based on those findings, Figure 12 is a 'rough process' flowsheet that might be considered as feasible experimental options, should our samples contain promising REE grades.

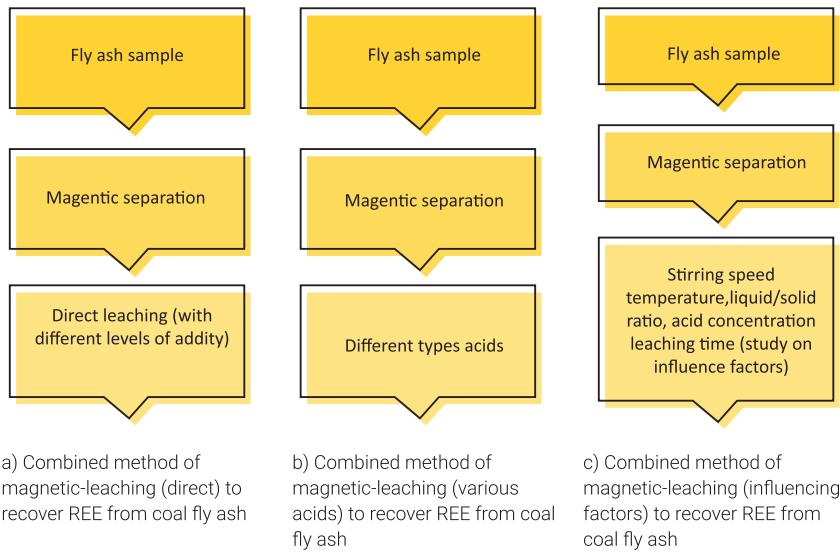
- Density separation methods were the least effective on fly ash due to its dispersion in lower density minerals.
- There is a possibility that REE content increases as magnetic properties decrease
- REE distribution in fly ash has high correlation with Al, Si.
- Chemical and thermal pre-treatment might have a high influence on

recovery performance.

- There are some cases where sequential leaching processes were yielding good results.
- REE content usually decreased with an increase in particle size.
- A combination of different methods is usually used to enhance the results.

Recommended analysis of the properties of REE-containing fly ash samples, to evaluate suitable process methods

- 1.Chemical analysis (ICP REE)
- 2.Mineral analysis (Mineralogy)
- 3.Size fraction (Screening)
- 4.REE content in different particle size distribution
- 5.REE content in magnetic and non-magnetic parts



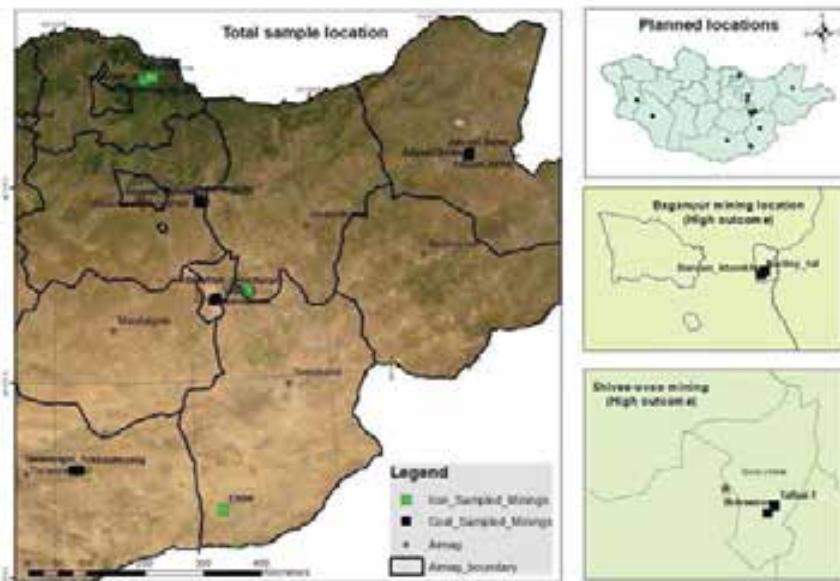
**Figure 12.** Possible ash enrichment flowsheets

# 2 Methodology

Worldwide, mine waste, which used to be harmful to human health and the environment, is now becoming the second most sought-after source of REEs. The first step is to determine the REE content by collecting samples from mines and thermal power plants. With the collaboration of REE Research Unit at Erdenes Mongol LLC, and based on their previous research on potential secondary sources of REEs in Mongolia, a total of 43 samples were collected from 6 coal mines, 3 iron ore mines and 2 thermal plants. The locations of the collected samples are shown in Figure 13.

**Table 8.** Samples collected from locations in Mongolia

Nº	Company Name	Name and Type of Mine	Location
<b>Iron ore and iron ore product samples</b>			
1	DMP LC	Tumurtei iron ore mining	Selenge Province, Khuder Sum
2	MONGOLROSTSVETMET SOE	Bargilt iron ore mining	Khentii Province, Darkhan Sum
3	Monlaa LLC	Elstei iron ore mining	Dornogovi Province, Khatanbulag Sum
<b>Coal and coal product samples</b>			
4	ENERGY RESOURCES LLC	Ukhaan Khudag coal mining	Umnugovi Province, Tsogtsii Sum
5	ADUUNCHULUUN LC	Aduunchuluun coal mining	Dornod Province, Kherlen Sum
6	BAGANUUR LC	Baganuur coal mining	Ulaanbaatar City, Baganuur District
7	SHARIIN GOL LC	Sharin Gol coal mining	Darkhan-Uul Province, Sharin Gol Sum
8	SHIVEE OVOO LC	Shivee Ovoo coal mining	Govisumber, Shiveegobi Sum
9	MEGA ERIN LLC	Bor Khulan coal mining	Dornogovi, Dalanjargal Sum
<b>Coal ash samples</b>			
10	TPP 4 SOE	Thermal power plant	Ulaanbaatar City, Bayangol District
11	DTOG SOE	Thermal power plant	Dornod Province, Choibalsan City



**Figure 13.** Locations of the collected samples

## 2.1 Results

In this study, different types of coal and iron deposits and thermal power plant samples were analysed for identifying the content of the REEs. For

coal samples, REEs are analysed from the ash. The results of the analyses are shown in Table 9.

**Table 9.** Total REE contents of collected all samples

Result №	SAMPLE NAME	COMPANY NAME	TOTAL REE, ppm
1	BKH coal	Mega Erin LLC	493.79
2	Baganuur BN5	Baganuur LC	353.53
3	Whole sample	Sharin Gol LC	303.53
4	ShO, level 5	Shivee Ovoo LC	296.86
5	TTP-4 fly ash	TTP-4 SOE	254.78
6	BN coking coal	Energy Resources LLC	246.05
7	SAAJ top	Sharin Gol LC	218.35

8	Baganuur BN2	Baganuur LC	207.39
9	UHG coking coal	Energy Resources LLC	199.07
10	BN thermal coal (SSCC )	Energy Resources LLC	195.75
11	ShO, level 2-2	Shivee Ovoo LC	192.35
12	Baganuur BN1	Baganuur LC	188.53
13	UHG reject coal, (S-541)	Energy Resources LLC	187.43
14	B.P empty rock	Mongolrostsvetnet SOE	173.09
15	Dornod thermal power plant-fly ash	DTOG SOE	167.44
16	Baganuur BN3	Baganuur LC	166.97
17	BN feed (PF-231)	Energy Resources LLC	165.92
18	UHG feed PF-231	Energy Resources LLC	165.50
19	ShO, level 2-1	Shivee Ovoo LC	162.29
20	UHG reject coal (FP)	Energy Resources LLC	159.04
21	BN reject coal (SC-541)	Energy Resources LLC	140.50
22	Baganuur BN4	Baganuur LC	124.74
23	UHG thermal coal(HCC )	Energy Resources LLC	121.95
24	SAAJ bottom	Shariin Gol LC	113.16
25	Tailing	Mongolrostsvetmet SOE	107.58
26	UHG reject coal (SC-446)	Energy Resources LLC	104.44
27	BN reject coal (FP)	Energy Resources LLC	104.39
28	Aduunchuluun coal	Aduunchuluun LC	93.60
29	Whole tailing	DMP LC	88.51
30	BN reject coal (SC-446)	Energy Resources LLC	87.81
31	Powder sample	Monlaa LLC	84.81
32	Iron concentrate 65%	Mongolrostsvetmet SOE	48.19
33	Zn slime	Mongolrostsvetmet SOE	46.66
34	Tailing (oxidized)	DMP LC	44.84
35	Iron concentrate 52%	Mongolrostsvetmet SOE	43.86
36	Feed	Mongolrostsvetmet SOE	43.85
37	Primary sample	Monlaa LLC	43.84
38	Middling	Mongolrostsvetmet SOE	40.34
39	Powder tailing	DMP LC	39.88
40	Zn ore	Mongolrostsvetmet SOE	34.16
41	Whole concentrate	DMP LC	33.27
42	Powder concentrate	DMP LC	31.79
43	Feed	DMP LC	31.32

From the results of Table 9: the REE content of Mega Erin LLC from the Bor Khulan coal mine sample (Result #1) is 493.79 ppm; the REE content of Baganuur's BN5 sample (Result #2) is 353.53 ppm; REE content of Shariin gol LC is (Result #3) 303.53 ppm, for Shivee Ovoo LC fifth layer's sample (Result #4) the REE content is 296.86 ppm; and TPP4's REE content (Result #5) is 254.78 ppm. These results are the top

5 mines with the highest REE content. From the result of our analysis, the top REE-containing mines are extracting lignite coal. As well as, TPP4 is using lignite coal, which has low calories

A comparison graph was made between the election results of the 5 samples with the highest content of REEs from the total of 43 samples (Figure 14).



**Figure 14.** Samples with the highest content total REEs

As can be seen from the graph above, among the 43 samples, the first

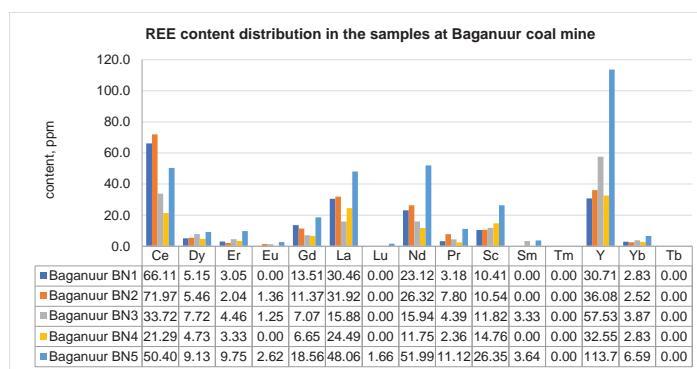
5 deposit samples with high content are all samples from lignite mines.

## 2.2

# REE content in coal and coal products

Mongolia is rich in coal deposits. Mined coal contains a wide range of elements; for example, 76 elements from the periodic table are found in coal. In coal, rare earth elements are present in amounts at 0.01 % <100 ppm grade. However even though the grade of REEs is less, there is a possibility for significant REE recovery and use due to the huge volume of coal mining and processing. The content of REEs in the ash and

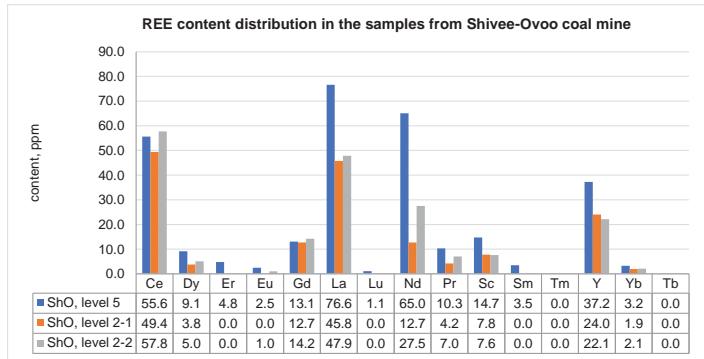
waste from burning and enriching coal is 5-10 times greater than the REE content in the coal deposits. This creates an opportunity to recover REEs from coal mining [26]. In this research, based on the geological data, 6 coal mine samples (Energy Resources LLC, Aduunchuluun LC, Baganuur LC, Shariin Gol LC, Shivee Ovoo LC, and Mega Erin LLC) are analyzed. The results of the analyses are shown in the following figures.



**Figure 15.**  
REE content,  
distribution in  
the samples at  
Baganuur coal  
mine

These results are from 5 samples in total from the Baganuur coal mine. According to the test results described in this graphic, the relatively higher content of elements are: Ce, La, Nd, Sc and Y, along with other, smaller amounts of REEs., Ce - 50.40 ppm, La - 48.06 ppm, Nd - 51.99 ppm, Sc-26.35 and Y -

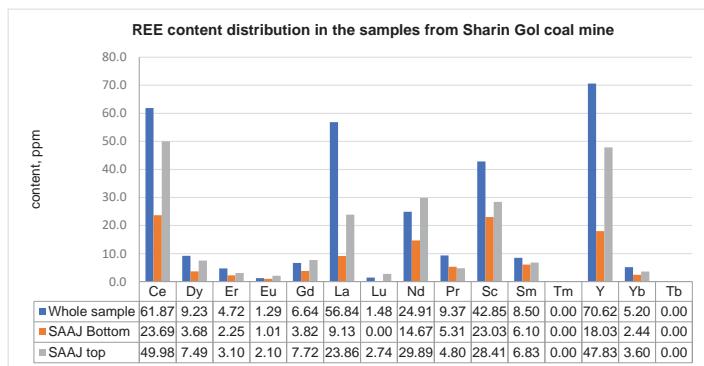
113.7 ppm was found in sample number BN5; relatively higher amounts then found in the 5 other samples. The total amount of REEs, separate from the 5 tested samples, were: BN1 188.53 ppm, BN2 207.39 ppm, BN3 166.97 ppm, BN4 124.74 ppm and BN5 353.53 ppm (Figure 15).



**Figure 16.**  
REE content distribution in the samples from Shivee Ovoo coal mine

The 3 samples from the Shivee Ovoo coal mine show relatively higher content of REEs such as Ce, La, Nd, and Y; other REEs were also present, as shown in this graphic. Ce - 55.60 ppm, La - 76.64 ppm, Nd - 65.04 ppm, and Y - 37.24 ppm were measured in sample number ShO level 5; among 3 other samples these elements

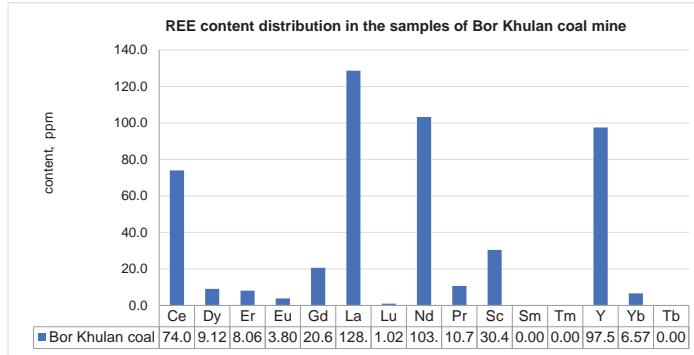
have relatively higher content of RREs than those found in other samples. The total amount of REEs separate from the 5 tested samples were found to contain: ShO level 5 -296.86 ppm, ShO level 2-1 - 162.29 ppm, and ShO level 2-2 - 192.35 ppm (Figure 16).



**Figure 17.**  
REE content distribution in the samples from Sharin Gol coal mine

The 3 samples the Shariin Gol coal mine show relatively higher content of the following REEs elements: Ce, La, Nd, Sc and Y. Other REEs are present in the amounts shown in the Figure 17. Additional REE-containing samples were measured in the following amounts: Ce - 61.87 ppm, La - 56.84 ppm, Nd - 24.91

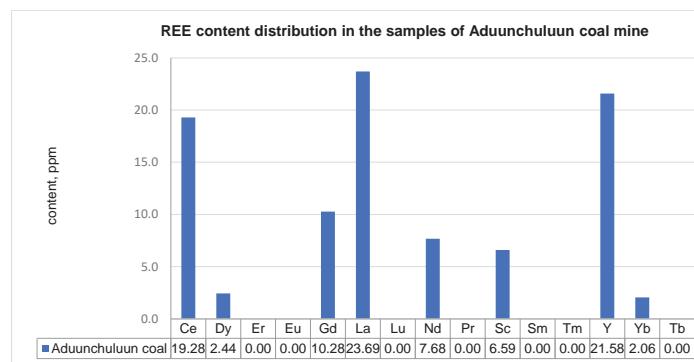
ppm, Sc-42.85 ppm and Y - 70.62 ppm. One sample from among 3 other samples were found to have relatively higher REE content than those found from other samples. The calculated total amount of REEs separately from the 3 tested samples were: 303.53 ppm, SAAJ bottom - 113.16 ppm and SAAJ top -218.35 ppm.



**Figure 18.**  
REE content,  
distribution in  
the samples of  
Bor Khulan coal  
mine

The one sample taken from the Bor Khulan coal mine showed relatively higher content of REEs: Ce, La, Nd, and Y, along with other, smaller amounts of REEs, as shown in Figure 18. The

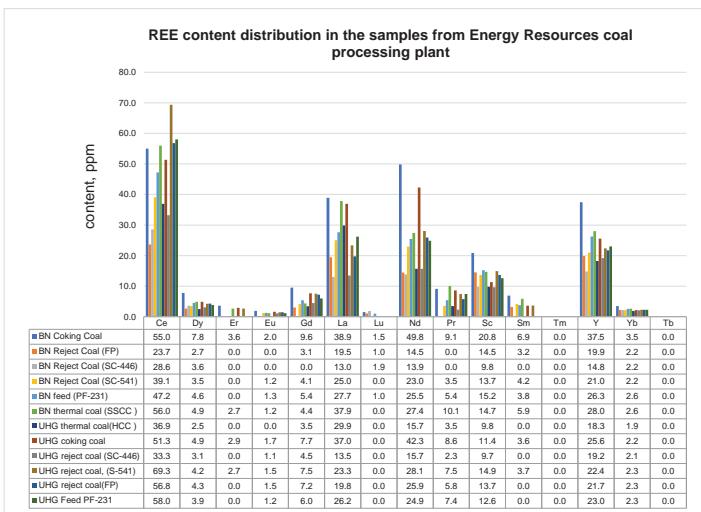
amounts were: Ce - 74.00 ppm, La - 128.6 ppm, Nd - 103.03 ppm, and Y - 97.51 ppm and the calculated total amount of REEs from this one sample was 493.79 ppm.



**Figure 19.**  
REE content,  
distribution in  
the samples of  
Aduunchuluun  
coal mine

One sample in total from the Aduunchuluun coal mine was tested, and showed relatively higher content of REEs such as: Ce, La, Nd, and Y. Other REEs were also found and tested, as

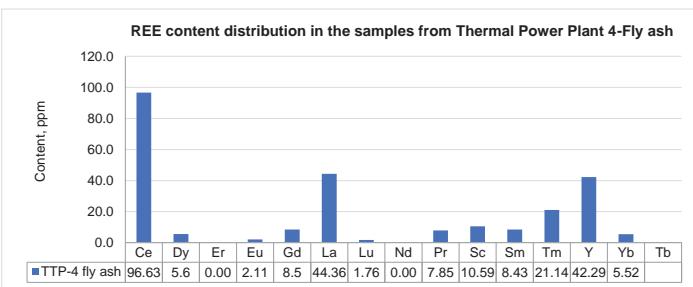
shown in Figure 19. The amount of REEs in the one sample taken at this mine site contained: Ce - 19.3 ppm, La - 23.7 ppm, and Y - 21.6 ppm and the total amount of REE was 93.60 ppm.



**Figure 20.**  
REE content,  
distribution in  
the samples  
from Energy  
Resources coal  
processing  
plant

There were 12 samples selected from the coal processing plant of Energy Resources. Relatively higher content of elements such as Ce, La, Nd, and Y other REE's were found, as shown in Figure 20. The total calculated amount of REEs of the 12 separately tested samples was: BN coking coal - 246.05 ppm; BN reject coal (FP) 104.39 ppm; BN reject

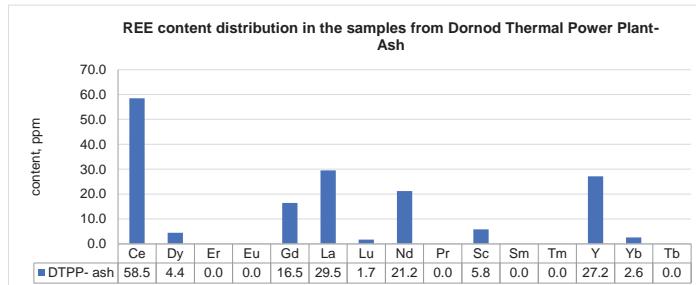
coal (SC-446) 87.81 ppm; BN reject coal (SC-541) 140.50 ppm; BN feed - 165.92 ppm; BN thermal coal (SSCC) -195.75 ppm; UHG thermal coal (HCC) -121.95 ppm; UHG coking coal 199.07 ppm; UHG reject coal (SC-446) 104.44 ppm; UHG reject coal (SC-541) 187.43 ppm; UHG reject coal (FP) 159.04 ppm; and UHG feed (PF) 165.50 ppm.



**Figure 21.**  
REE content,  
distribution in  
the samples  
from Thermal  
Power Plant-4-  
fly ash

From the one sample taken from Thermal Power Plant-4 (TTP-4), results show a relatively higher content of elements such as Ce, La, and Y other REEs, as shown in Figure 21. The REE

content was determined from this fly ash sample: Ce - 93.63 ppm, La - 44.36 ppm, and Y - 42.69 ppm and the total amount of REEs from this site was 25.78 ppm.



**Figure 22.**  
REE content,  
distribution in  
the samples  
from Dornod  
Thermal Power  
Plant- ash

One sample from the Dornod Thermal Power Plant (DTTP) ash was examined. It yielded relatively higher content of elements such as Ce, La, and Y, and other REEs, as shown in Figure 22. The amount of REEs from this sample from DTTP ash was found to contain Ce - 58.51 ppm, La - 29.9 ppm and Y - 27.16 ppm. The calculated total amount of REEs from this sample was 167.44 ppm.

Based on the above test results, it was determined that the REEs Ce, La, Nd, and Y, and small amounts of other REEs were found in the coal samples that we selected for testing. It means

that coal with the lesser structure of metamorphism have relatively higher content of REEs, and usually it is related to their organic substances. In other words, the group of active functions is reduced during the process of increasing metamorphic levels of coal, and it is affected by reducing the content of salt-type rare earth and other elements. Sparse coal and anthracites contain less REEs, and it is related to the above reason. Therefore, we've chosen the mine deposits mentioned above for our research and determined the content of rare earth elements from them.

## 2.3 REE content from iron mines

Recently, research has been intensified to separate REEs from iron ore tailings. REE content from iron mining tailings depends on the beneficiation process and type of ore deposit. If the process is flotation, the REE concentration in tailings is low (for reference - around 20ppm Total REE) and REE concentration in tailings after the roasting and magnetic separation processes is higher (for reference - around 400ppm Total REE, which is close to iron ore Total REE concentration) [29]. Some studies have suggested that the enrichment of the REE content of iron mining tailings is much higher than that of the REEs found in the primary

ore. One finding from of these studies indicated that most iron mining tailings are composed of iron oxides and quartz. Quartz and iron oxides contain rare earth minerals. Rare earth minerals in the tailings are likely to be bastnaesite and monazite. The particle size of rare earth minerals in the tailings varies but can range from 0.2 to 720 µm.

With the collaboration of the REEs Research Unit and based on their previous research on potential secondary sources of REEs in Mongolia, samples were collected from 3 iron mines. REE content of the collected samples was determined by chemical analyses. Figure 25 shows the results of these analyses.

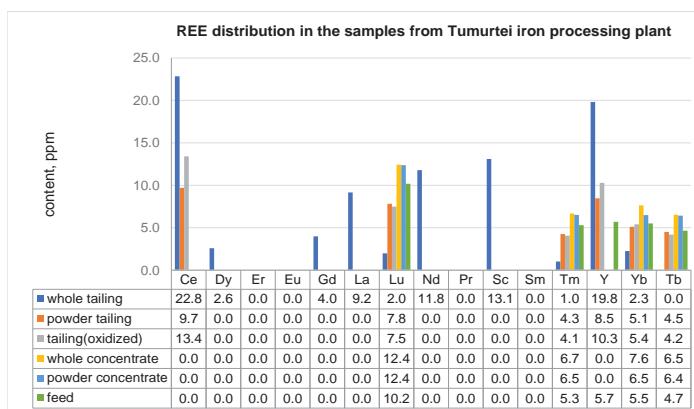


Figure 23.  
REE distribution  
in the samples  
from Tumurtei  
iron processing  
plant

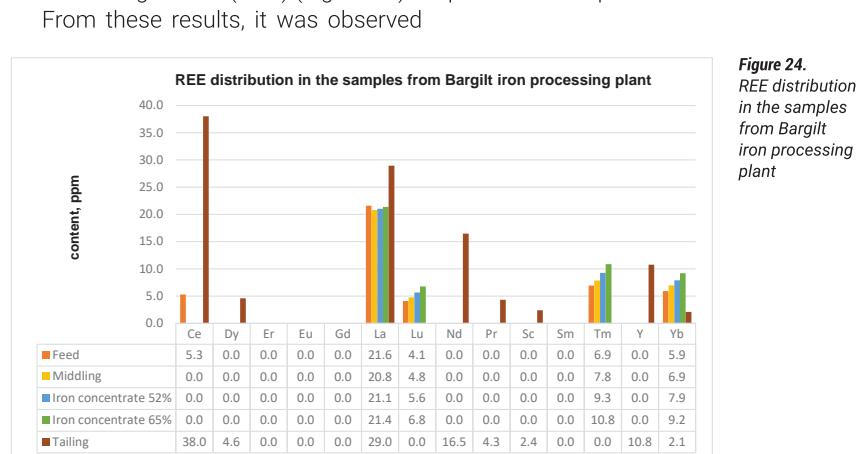
The 6 samples from the Tumurtei iron ore mine show relatively higher content of REEs such as Ce, La, Nd, Sc and Y than the other elements described above. The REE content was determined to be: Ce - 22.84 ppm, La - 9.14 ppm,

Nd - 11.78 ppm, Sc-13.09 ppm and Y - 19.82 ppm from all 6 tailings samples and these elements have relatively higher REE content than those found in other samples. The total amount of REEs for the 6 samples was: -88.51 ppm

for whole tailing wastes, 39.88 ppm for powdered tailing, 44.84 ppm for tailing (oxidized), 33.27 for whole concentrates, 31.79 ppm for powder concentrates and 31.32 for original ore (feed) (Figure 23).

From these results, it was observed

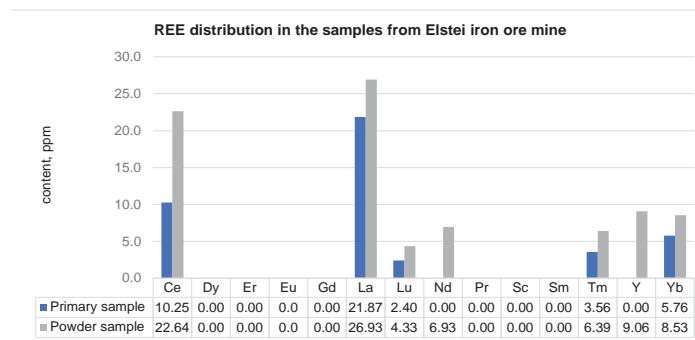
that the content of REEs increased as sample fraction size decreased. This could be caused by liberation of REE-containing minerals during the grinding process in the plant.



**Figure 24.**  
REE distribution  
in the samples  
from Bargilt  
iron processing  
plant

A total of 4 samples were obtained from the iron processing plant of Bargilt. Samples with the relatively higher REE-containing amounts included: Ce, La, Nd, Y, and other smaller amounts of REEs, as shown in Figure 25. The total amount of REEs found in these sample tailings are: Ce - 38.01 ppm; La - 28.96 ppm; Nd - 16.46 ppm; and Y - 10.76 ppm.

The samples contain relatively higher amounts of these REEs than is found in the other samples. It's calculated total amount of REE's We also calculated the percentage of REEs found in the following sources: iron concentrate (52%) - 43.86 ppm; iron concentrate (65%) - 48.19 ppm; middling- 43.86 ppm and tailing- 107.58 ppm (Figure 24).



**Figure 25.**  
REE distribution  
in the samples  
from Elstei iron  
ore mine

A total of 2 samples were obtained from the Elstei iron ore mine. As shown in Figure 25, relatively higher amounts of the following REEs were found: Ce and La other smaller amounts of REEs. The amount of each REE was determined to be: Ce - 22.64 ppm and La - 26.93 ppm from the one powder sample. These elements have relatively higher REE content than those found in other samples.

From these results, the powder

samples (43.81 ppm total REE) were higher in REE content than primary sample (84.81 ppm total REE), indicating enrichment from the grinding process.

From these results, it was observed that the content of REEs increased as sample fraction size decreased. This observation was as same as ash result. This could be also caused by liberation of REE-containing minerals during the grinding process in the plant.

# 3

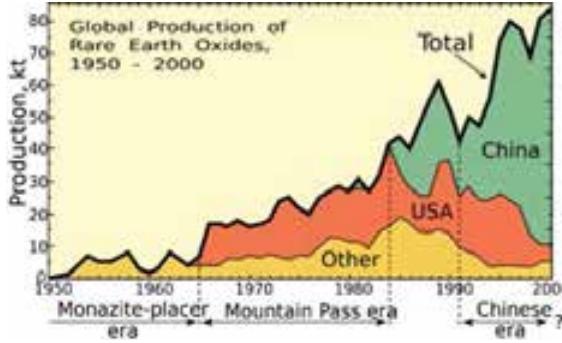
## Supply and Demand for REEs

### 3.1 Rare Earth Elements Production

Until 1948, most of the world's rare earths were sourced from placer sand deposits in India and Brazil. Through the 1950s, South Africa was the world's rare earth source, from a monazite-rich reef at the Steenkamskraal mine in the western province. Through the 1960s until the 1980s, the Mountain Pass rare earth mine in California made the United States the leading producer. Today, the Indian and South African deposits still produce some rare-earth concentrates, but they are dwarfed by the scale of Chinese production. In 2017, China produced 81% of the world's rare earth supply, mostly in Inner Mongolia although that location had only 36.7% of reserves. Australia was the second and only another major producer, with 15% of world production [27]. All of the world's heavy rare earths (such as dysprosium) come from China's rare earth sources such as the polymetallic Bayan Obo deposit. The Browns Range mine, located 160 km southeast of Halls Creek in northern in Western Australia, is currently under development and is positioned to become the first significant dysprosium producer outside of China [28].

Increased demand has strained supply, and there is growing concern that the world may soon face a shortage of the rare earths. In several years from 2009 worldwide demand for rare earth elements was expected to exceed supply by 40,000 tonnes annually unless major new sources could be developed. In 2013, it was stated that the demand for REEs would increase due to: the dependence of the EU on these elements; the fact that REEs cannot be substituted by other elements; and that REEs have a low recycling rate.

Furthermore, due to the increased demand and low supply, future prices are expected to increase and there is a chance that countries other than China will open REE mines. REE is in increasing demand due to the fact that they are essential for new and innovative technologies that are being created. These new products that need REEs to be produced are: high technology equipment such as smart phones; digital cameras; computer parts; semiconductors, etc. In addition, these elements are more prevalent in the following industries: renewable energy technology; military equipment; glass making; and metallurgy.



**Figure 26.**  
Global production of Rare Earth Oxides, 1950-2000 source [27]

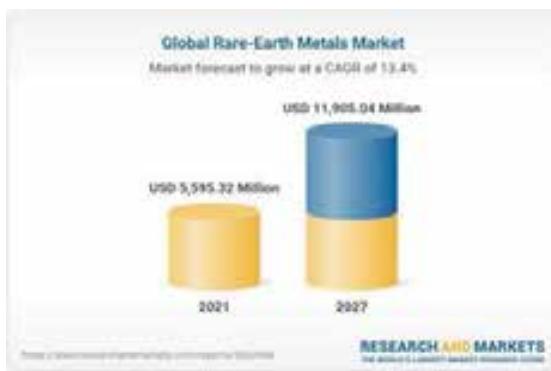
In 2019, China supplied between 85% and 95% of the global demand for the 17 rare earth powders, half of them sourced from Myanmar. After the 2021 military coup in that country, future supplies of critical ores were possibly constrained. Additionally, it was speculated that

the PRC could again reduce rare earth exports, to counter-act economic sanctions imposed by the US and EU countries. Rare earth metals serve as crucial materials for EV-manufacturing and high-tech military applications.

## 3.2 Rare Earth Elements Market Size

The Global Rare Earth Metals Market size was estimated at USD 5,595.32 million in 2021, USD 6,335.74 million in 2022, and is projected to grow at a

Compound Annual Growth Rate (CAGR) of 13.40% to reach USD 11,905.04 million by 2027 [29].



**Figure 27.**  
Global RE metals market [29]

The Global Rare Earth Metals Market was estimated to be valued at \$5595.3 Million in 2021. The growth rate of the Global Rare Earth Metals Market is 13.4%, with an estimated value of \$11905.0 Million by 2027. Key companies in the Global Rare Earth Metals Market include Alkane Resources Ltd., American Rare Earths Limited, Arafura Resources Ltd., Avalon Advanced Material Inc., Baotou Hefa Rare Earth Co. Ltd., Baotou Jinmeng Rare Earth Co. Ltd., Canada Rare Earth Corporation, China Minmetals Rare Earth Co. Ltd. and China Northern Rare Earth (Group) High [30]. To make the business case, the calculations differ depending on which method is chosen. Furthermore, the markets to which the RREs should be supplied are also a consideration.

From the above table, price was increased suddenly in 2020. In 2021, the price of terbium oxide and dysprosium oxide was doubled the price of 2020.

**Table 10.** Average price of selected rare earth oxides from 2015 to 2021(in U.S. D per kilogram)

Rare earth oxide	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Terbium oxide 99.99% minimum	564	415	501	455	507	670	1300
Dysprosium oxide, 99.5% minimum	279	198	187	179	239	261	400
Neodymium oxide, 99.5% minimum	48	40	50	50	45	49	49
Europium oxide, 99.9% minimum	344	74	77	53	35	31	31
Mischmetal, 65% cerium, 35% lanthanum	7	5	6	6	6	5	6
Lanthanum oxide, 99.5% minimum purity	3	2	2	2	2	2	2
Cerium oxide, 99.5% minimum purity	3	2	2	2	2	2	2

# 4

## REE Extraction: Environmental Impact

In light of the rapidly growing demand for REE exploration and production around the world, we are faced with the fundamental need to identify the environmental impacts to predict potential environmental harm.

In this part of the study, the potential environmental impact of the extraction of REE from coal ash (secondary sources) is determined. This coal ash is produced as waste from approximately 30 thermal power plants across Mongolia. Coal ash is classified into fly ash and bottom ash. Therefore, ash is not a natural resource in the sense that it is a post-industrial

waste that has been used and discarded from natural resources.

Only fly ash can be combusted separately as waste at on both Thermal Power Plant (TPP) number 4 and "Amgalan" TPP.

In Mongolia, coal is used for heating and electricity, so it is considered a country with the "inevitable use" of coal in terms of its cold weather climate condition.

Then, this waste is exposed outdoors in thermal power plant tailings dams, where the moisture evaporates into the air, and the residue remains in the soil.

### 4.1 Adverse environmental impact

To anticipate potential harm to the environment, it is necessary to identify all potential environmental impact effects from the extraction process of REEs from secondary sources.

This study yielded several interesting results, for example, one of the sources with the highest grade was coal ash from thermal power plants. Therefore, we determined the environmental impacts

of this coal ash extraction technology for each of its high-risk components. Also, in this section, the positive and negative effects of extracting GHG from secondary sources rather than primary sources are described.

1. Adverse impact on air
2. Adverse impact on soil
3. Adverse impact on water

#### Impacts on air

The main or the biggest impact of REE extraction activity on the atmosphere is the fine particle dust, which is identified

using the dust emission factor [31]. The emission factor is a statistical average of the intensity of dust emissions, or

the amounts of pollutants emitted into the air during a given period, which is multiplied by the rate of activity. The total amount of pollutants emitted by any source, including coal ash, shall be

equal to the emission factor for each source multiplied by the number of each source. Air pollutants are emitted from each source and their emission factors must be calculated.

#### **Equation of Dust emission factor [32]**

$$E = A \times EF \times (1-ER/100)$$

E = emissions; A = activity rate;

EF = emission factor;

ER = overall emission reduction efficiency %

**Table 11.** Technological steps of pre-treatment of coal ash extraction

Technological name	Main process	Technological detailed process
Mechanical transporting stage until the disposal phase, using auto vehicle	1. Ash collection	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ash mix</li> <li>- Ash packing</li> <li>- Delivery/transportation distance</li> <li>- Loading</li> </ul>
	2. Ash pre-treatment	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transportation</li> <li>- Unloading</li> <li>- Ash arrangement</li> <li>- Packaging</li> <li>- Disposal</li> </ul>



**Figure 28.** Coal ash and coal stockpile condition at Thermal Power Plant-4

Thermal Power Plant - 4 maintains a coal ash waste basin holding area of approximately 30 – 40 hectares, by way of comparison, that is approximately 10 times bigger than the area of Sukhbaatar

square.

For further detailed studies, it may be convenient to use Equation 1 to calculate the negative impact on air.

## **Adverse impact on soil**

Considering the impact on the soil by the REE extraction process, it is expected

that most amounts of the treated ash from the extraction process are dumped in

the open field. The REE extracted amount shows that <1% out of the total recycling is feed ash. However, it is too early for us to estimate any impact on the soil.

However, it is too early to estimate any

adverse impacts on the study material, and the environmental impact of TPP-4 ash recycling is likely to be at a "moderate" level.

## Adverse impact on water

The process or recycling ash itself, "low" risk in terms of causing harm to natural water, unless it uses methods with water consumption in its leaching and tailings-related technology.

## 4.2 Other impacts of REE extraction

According to previous studies, the following are positive effects of extracting REEs from secondary sources:

1. High levels of radioactive elements such as K, U, and Th contained in coal ash are harmful to human health, on the other hand, they have a positive effect on the process of fertilizing the soil that supports

plants [33] [34].

2. No matter how the modern, eco-friendly technologies are used in mining operations, the impact on the environment has high consequences for each factor. However, the direct environmental impact of reusing secondary sources is relatively lower than the mining operation itself.

# 5 Summary

1. The prices of REEs, which are essential to many advanced technologies in modern days, have been constantly rising due to increasing demands and supply shortages.
2. There are some constraints in the conventional mining of REE as a result of environmental and economic issues followed by legislation and trade restrictions.
3. Due to these issues and the constantly growing demand for REEs, research to find secondary sources with promising REE content was highly sought.
4. To investigate the viability of the sources as potential repositories of rare earths, and the different types (fly ash, coal process plant, iron ore), samples from various locations in Mongolia were collected.
5. REE extraction methods from the mentioned sources have also been reviewed and studied.
6. With the collaboration of the REE research unit, a total of 43 samples were collected from 11 mines and their REE content was determined.
7. From the results, it was revealed that TREE grades from the coal sources sampled were ~500 ppm
8. Sample of Bor Khulan coal mine for Mega Erin LLC – 493.79 ppm
9. Elements, namely Ce, La, Y, were the highest in most of the collected samples.
10. Even though there were a few coal samples with considerable content of REEs, overall, they didn't reach the cutoff grade.
11. Previous researchers have found that REE content increases as the size fraction decreases. Our findings in this study match these results. cite
12. In addition, previous research has shown that lignite coal has higher content of REEs compared to other types of coal. Our findings also match this research.cite

13. A potential downside of our study design was that only one sample was taken from each study site. In the future, more samples should be taken from each site in order to improve the sample representativeness.
14. In the future, experiments should be performed on the high-REE content grades, even if they don't meet the cut-off grade, in order to develop optimum processes, for REE extraction. This is because these sources are in relatively higher abundance, thus contributing to the overall potential yield.
15. According to other research, different conditions of the coal combustion process has an effect on the enrichment of REEs in their ash, Therefore, combustion testing should be conducted to evaluate how its various parameters affect the enrichment of REE-containing ash.

## References

---

1. Hobart M. King. Ree - rare earth elements and their uses [Internet]. geology. Available from: <https://geology.com/articles/rare-earth-elements/>
2. Gupta C, Krishnamurthy N. Extractive metallurgy of rare earths. CRC Press, (2005), 484
3. Sutherland WM, Cola EC. Comprehensive report on Rare Earth elements in Wyoming. Laramie, WY: Wyoming state geological survey; 2016
4. LePan N, Conte WBN, Graphics & Design Pernia Jamshed. Rare earth elements: Where in the world are they? [Internet]. Visual Capitalist. 2021. Available from: <https://www.visualcapitalist.com/rare-earth-elements-where-in-the-world-are-they/>
5. Geoscience Frontiers. 2019Jul;10(4):1285–303.
6. Sponsored by LSM Analytical Services Jun 19 2013. Laboratory testing of Rare earth elements (rees) [Internet]. AZoM.com. 2018. Available from: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9284>
7. Өндөр технологийн үндсэн түүхий эд нь газрын ховор элемент [Internet]. <http://erdenesmongol.mn/>. Available from: <http://erdenesmongol.mn/index.php?view=article&type=item&val=832>
8. Peiravi M, Dehghani F, Ackah L, Baharlouei A, Godbold J, Liu J, et al. A review of rare-earth elements extraction with emphasis on non-conventional sources: Coal and coal byproducts, iron ore tailings, apatite, and phosphate byproducts. Mining, Metallurgy & Exploration. 2020;38(1):1–26.
9. Carlos Ayora, Ester Torres, Francisco Macías. Recovery of rare earth elements and yttrium from passive-remediation systems of acid mine drainage. 2016;
10. Franus W, Wiatros-Motyka MM, Wdowin M. Coal fly ash as a resource for rare earth elements. Environmental Science and Pollution Research. 2015;22(12):9464–74.
11. Hermassi M, Granados M, Valderrama C, Ayora C, Cortina JL. Recovery of rare earth elements from acidic mine waters: An unknown secondary resource.

- Science of The Total Environment. 2022;810:152258.
12. Moran-Palacios H, Ortega-Fernandez F, Lopez-Castaño R, Alvarez-Cabal JV. The potential of iron ore tailings as secondary deposits of rare earths. *Applied Sciences*. 2019;9(14):2913.
  13. Koen B, Yiannis P, Peter Tom J, Tom VG, Bart B. Recovery of rare earths from industrial waste residues: A concise review.
  14. Pan J, Nie T, Vaziri Hassas B, Rezaee M, Wen Z, Zhou C. Recovery of rare earth elements from coal fly ash by integrated physical separation and acid leaching. *Chemosphere*. 2020;248:126112.
  15. Honaker RQ, Groppe J, Yoon R-H, Luttrell GH, Noble A, Herbst J. Process evaluation and flowsheet development for the recovery of rare earth elements from coal and associated byproducts. *Minerals & Metallurgical Processing*. 2017;34(3):107–15.
  16. Abaka-Wood GB, Zanin M, Addai-Mensah J, Skinner W. Recovery of rare earth elements minerals from iron oxide-silicate rich tailings – part 2: Froth flotation separation. *Minerals Engineering*. 2019;142:105888.
  17. Royen H, Fortkamp U. Rare Earth Elements - Purification, Separation and Recycling [Internet]. IVL Svenska Miljöinstitutet; 2016. (C-rapport). Available from: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ivl:diva-311>
  18. Dong Z, Mattocks JA, Deblonde GJ-P, Hu D, Jiao Y, Cotruvo JA, et al. Bridging hydrometallurgy and biochemistry: A protein-based process for recovery and separation of rare earth elements. *ACS Central Science*. 2021;7(11):1798–808.
  19. Zhang W, Noble A, Yang X, Honaker R. A comprehensive review of rare earth elements recovery from coal-related materials. *Minerals*. 2020;10(5):451.
  20. Moran-Palacios H, Ortega-Fernandez F, Lopez-Castaño R, Alvarez-Cabal JV. The potential of iron ore tailings as secondary deposits of rare earths. *Applied Sciences*. 2019;9(14):2913.
  21. Chancey RT, Stutzman P, Juenger MCG, Fowler DW. Comprehensive phase characterization of crystalline and amorphous phases of a class F fly ash. *Cement and Concrete Research*. 2010;40(1):146–56.

22. Wang Z, Dai S, Zou J, French D, Graham IT. Rare earth elements and yttrium in coal ash from the Luzhou Power Plant in Sichuan, Southwest China: Concentration, characterization and optimized extraction. International Journal of Coal Geology. 2019;203:1–14.
23. Kolker A, Scott C, Hower JC, Vazquez JA, Lopano CL, Dai S. Distribution of rare earth elements in coal combustion fly ash, determined by shrimp-rg ion microprobe. International Journal of Coal Geology. 2017;184:1–10.
24. Pan J, Hassas BV, Rezaee M, Zhou C, Pisupati SV. Recovery of rare earth elements from coal fly ash through sequential chemical roasting, water leaching, and acid leaching processes. Journal of Cleaner Production. 2021;284:124725.
25. Abaka-Wood GB, Ehrig K, Addai-Mensah J, Skinner W. Recovery of rare earth elements minerals from iron-oxide-silicate-rich tailings: Research Review. Eng. 2022;3(2):259–75.
26. Janchiv N. Coal chemistry and technology basis. 2012;2:182–189
27. Rare earth elements—critical resources for high technology: USGS fact sheet 087-02 [Internet]. Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology | USGS Fact Sheet 087-02. Available from: <https://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/>
28. Yu X-L, Bai L, Wang Q-C, Liu J, Chi M-Y, Wang Z-C. Recovery of rare earths, niobium, and thorium from the tailings of giant Bayan Obo Ore in China. Metallurgical and Materials Transactions B. 2012;43(3):485–93.
29. Itd Rand M. Rare-earth metals market research report by type, application, region - global forecast to 2027 - cumulative impact of covid-19 [Internet]. Research and Markets - Market Research Reports - Welcome. Available from: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5322966/rare-earth-metals-market-research-report-by-type>
30. Fortune business insight, Metals and Minerals, Rare Earth Elements Market, Available from: <https://www.fortunebusinessinsights.com/rare-earth-elements-market-102943>
31. NPI emission estimation technique manual for mining - dcceew.gov.au [Internet]. 1999. Available from: <https://www.dcceew.gov.au/sites/default/files/documents/mining.pdf>

32. US EPA O. AP-42: Compilation of air emissions factors. 2016 Available from: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>
33. Maiti D, Prasad B, Researchgate.net. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/295590584> Revegetation of fly ash - A review with emphasis on grass legume plantation and bioaccumulation of metals.
34. Basu M, Pande M, Bhadoria PBS, Mahapatra SC. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. *Prog Nat Sci* [Internet]. 2009;19(10):1173–86. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007109001579>



 Хаяг: Улаанбаатар хот, Налайх дүүрэг,  
 2-р хороо, МГТИС-ийн хотхон

 Утас: 7023-2090

 Email: office@gmit.edu.mn; info@gmit.edu.mn

 Website: www.gmit.edu.mn

 Facebook: German-Mongolian Institute for Resources and Technology - GMIT