



ЭРДЭМ ШИНЖИЛГЭЭНИЙ БҮТЭЭЛ

Хотгор ордын газрын ховор элементийн хүдэр ба эрдсийн шинж чанар

Г.Бурмаа*, С.Ален, Т.Азаяа

*Шинжлэх ухааны академи, Хими, химийн технологийн хүрээлэн, Улаанбаатар 13330, Монгол улс***E-mail: burmaa.icct@gmail.com*

Хүлээн авсан: 20.10.2018

Хяналтанд: 23.10.2018

Хэвлэлтэнд авсан: 05.11.2018

Хураангуй: Газрын ховор элемент (ГХЭ)-ийн олон шинэ ордууд нээгдэж байгаа ч тэдгээрийн хүдрээс ГХЭ-ийг баяжуулан ялгаж авах, баяжмалыг боловсруулах техник технологийн мэдлэг хязгаарлагдмал байгаа өнөө үед Монгол улс дахь ГХЭ-ийн хүдэр, эрдсийн химийн технологийн шинж чанарыг нарийвчлан судалж, академик судалгааны мэдлэг хуримтлуулах, баримт материал бий болгох нь нийгэм, эдийн засгийн чухал ач холбогдолтой. Өмнөговь аймгийн нутагт орших Хотгор ордын гадаргын чулуулаг ба хүдрийг электрон микроскоп, SEM/EDX ба рентген дифракцийн аргаар судлав. Чулуулаг нь гадаргуугийн өгөршилд өртсөн сиенит ба брекчлэг бүтэц үүсгэсэн нефелин сиенит чулуулгаас тогтсон, сиенит нь карбонатитээр бага зэрэг түрэгдсэн 1-3% хүртэл апатит (фторapatит) болон барит, целестин, пирит, магнетит зэрэг эрдэс агуулж байна. Чулуулагт ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж 0.02-1.6%, түүний 86.2-95.7% нь церийн бүлгийн элементүүдэд ноогдоно. Хүдрийн чулуулаг нь апатит (фторapatит) болон барит, целестин, пирит, магнетит зэрэг эрдэс агуулсан сиенит ба нефелин сиенит, ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж 2.18%, мөн түүний 95%-ийг хөнгөн ГХЭ-үүд эзэлж байна. Энэхүү судалгаанд чулуулаг, хүдэр, эрдсүүдийн химийн бүрдэл, ГХЭ-ийн агууламж, тээгч ба дагалдах зарим эрдсүүдийн шинж чанарыг судалсан үр дүнгээс оруулав.

Түлхүүр үг: *нефелин, сиенит, апатит, фторapatит***ОРШИЛ**

ГХЭ-д лантанойдын бүлгийн 15 элемент, тэдгээртэй химийн шинж чанараараа төстэй иттри болон зарим үед скандийг [1] оруулсан байдаг. ГХЭ-үүдийг 2 дэд бүлэгт хуваадаг. Лантанаас европи хүртэлхийг хөнгөн буюу церийн, гадолинээс лютеци хүртэлх болон иттрийг хүнд ГХЭ гэнэ [1, 2]. ГХЭ-үүд дэлхийн царцдаст харьцангуй их хэмжээтэй агуулагдана. Гэхдээ тэдгээрийн эрдсийг олборлон ашиглахад хүндрэлтэй байдгийн гол шалтгаан нь эдийн засгийн ач холбогдолтой агууламжтайгаар олдоггүй оршино [3, 4]. ГХЭ-үүд байгальд цэвэр металл хэлбэрээр оршдоггүй, силикат, оксид, карбонат, фосфат ба галид зэрэг янз бүрийн эрдсүүдэд агуулагдана [4, 5]. Тэдгээрийн 250 гаруй эрдсүүд байх ба олонх нь ГХЭ-ийг маш бага хэмжээтэй буюу 10-аас 300 ppm хүртэл агуулдаг [3,4,6,7]. Газрын ховор металлууд ба тэдгээрийн нэгдлүүдийн хими, каталитик, цахилгаан, соронзон болон оптик шинж чанараас хамааран хэрэглээний хүрээ нь хурдацтай өргөжин тэлж байна. Сүүлийн жилүүдэд хүчтэй тогтмол соронзон, цахим дэлгэцийн гэрэлтүүлэг, гар утас, шинэ энергийн технологи, өвөрмөгц шинж чанартай хайлш үйлдвэрлэх зэрэг өндөр технологид ГХЭ-ийг ашиглах хэрэгцээ шаардлага өсөн нэмэгдсээр байна [8-10]. Дэлхийн хэмжээнд газрын ховрын оксидын зуун сая

орчим тонн нөөц бүртгэгдсэн. Энэхүү нөөц баялаг нь 30 гаруй орны нутаг дэвсгэрт тархан оршдог [11] боловч өнөө үед ГХЭ-ийн нөөц баялгийн 97% нь Хятад улсад илэрсэн байна [12]. Хятад улсад ГХЭ-ийн хүдрийг олборлох, боловсруулах техник технологи хурдацтай хөгжиж, тус улсын засгийн газар жилд экспортлох ГХЭ-ийн оксидын хэмжээг хязгаарлан 35000 тонн орчим болгосон. Гэтэл бусад орнуудын жилийн хэрэгцээ 2015 онд 80000 тонн байжээ [6, 11]. Хангамж ингэж багассан нь ГХЭ-ийн олон шинэ ордыг нээн ашиглах шаардлага бий болсон. Фосфатын томоохон хэмжээний тунамал болон магмын ордуудын үндсэн эрдэс болох фторapatит нь ГХЭ гаргаж авах чухал эх үүсвэр болдог. Фосфатын ордуудыг ашиглан их хэмжээний фосфорын хүчил ба бордоо үйлдвэрлэх явцад апатит дэх ГХЭ-ийн багахан агууламж нь хуримтлагдан ГХЭ-ийн үлэмж хэмжээний нөөцийг бүрдүүлнэ. Хүдрийн бүрэлдэхүүний өвөрмөгц шинж чанар, баяжуулах материал дахь хүдрийн бус эрдсүүдийн төрөл, агуулгаас хамааруулан баяжуулах технологи, баяжмалыг боловсруулах химийн технологийг сонгоно. Иймд ГХЭ-ийн хүдэр, ГХЭ агуулагч эрдсүүд, дагалдагч хоосон чулуулгын химийн найрлага, төрөл болон ширхэглэл, хатуулаг зэрэг физикийн, химийн үзүүлэлтийг судалсан судалгаа шинжилгээний үр дүнгээс энд дурдсан болно.

СУДАЛГААНЫ МАТЕРИАЛ, АРГА ЗҮЙ

Өмнөговь аймгийн Ханхонгор, Цогт-Овоо сумдын нутгийн заагт орших Хотгорын ГХЭ-ийн үндсэн ордын хүдрийн 2 төрлийн дээжийг судалгааны материалаар авсан. Эхнийх нь тус ордын гадаргын чулуулагт хамаарах 8 дээж (Хотгор-1, Хо-1, Хо-2.1, Хо-4, Хо-3.2, Хо-4, Хо-5, Хо-6), хоёр дахь нь 37 ба 45-р цооногийн чөмгөн хүдрээс технологийн туршилтанд

цагаан (6.03-9.46%), төмөр (0.92-5.63%), кальци (0.21-3.96%) ба фосфор (0.07-1.91%)-ын агууламж хамгийн их, магни, манган, титан багавтар хэмжээтэй агуулагдаж байна. Хо-3.2, Хо-6 дээжүүдэд бари 1.0%-иас, энэхүү 2 дээж болон Хо-7 дээжинд стронци 0.5%-иас их агууламжтай тодорхойлогдсон. Энэ нь бари, стронци нь ГХЭ-ийн хүдэр дэх апатит эрдсийн кальцитай изоморф халалцалд орсон болон

Хүснэгт 1. Хотгорын ордын чулуулаг дахь үндсэн элементүүдийн агууламж, %

№	Элемент	Хотгор-1	Хо-1	Хо-2.1	Хо-3.2	Хо-4	Хо-5	Хо-6	Хо-7
1	Al	8.75	6.03	8.35	9.32	7.45	6.93	9.46	8.66
2	Ca	0.66	0.70	0.31	1.51	0.21	0.55	0.43	3.96
3	Fe	1.01	5.63	2.18	3.83	4.89	2.84	0.92	2.94
4	K	11.75	7.89	10.35	7.22	9.22	8.70	7.50	4.64
5	Mg	0.02	0.11	0.04	0.13	0.13	0.03	0.04	0.08
6	Mn	0.012	0.20	0.022	0.033	0.045	0.025	0.009	0.13
7	P	0.12	0.07	0.08	1.91	0.07	0.10	1.42	1.30
8	Ti	0.14	0.30	0.26	0.29	0.39	0.19	0.21	0.15
9	Ba	0.42	0.68	0.71	>1.0	0.59	0.28	>1.0	0.03
10	Sr	0.46	0.21	0.39	>0.5	0.21	0.42	>0.5	>0.5
11	ΣГХЭ	0.0322	0.0228	0.0214	0.534	0.0185	0.212	0.113	1.615

зориулан геологичдын бэлтгэсэн 500 кг дээжнээс шинжилгээнд бэлтгэсэн дээжүүд болно. Хүдрийн химийн бүрэлдэхүүн элементүүд, ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж болон ГХЭ нэг бүрийн агууламжийг ICP-OES ба ICP-MS (DIG-90A) аргуудаар тодорхойлов. Хотгор ордын гадаргын чулуулаг болон цооногийн дээжүүдийн минералогийн шинжилгээг электрон микроскопын ба SEM/EDX-ийн аргаар тодорхойлуулав. ГХЭ-ийн хүдрийн рентген фазын шинжилгээг нунтагийн рентген дифрактометрийн

барит, стронцианит ба целестин эрдсийн хэлбэрээр оршиж байгааг гэрчилнэ. Хо-6, Хо-5, Хо-3.2 ба Хо-7 дээжүүдэд нийлбэр ГХЭ-ийн агууламж харьцангуй өндөр, 0.113-1.615% илэрсэн нь үйлдвэрлэлийн ач холбогдолтой хэмжээнд байна. Ялангуяа Хо-7 дээжийн ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж өмнө судалсан технологийн туршилтын дээжний агууламжтай [13] адил түвшинд байгаа нь гадаргын болон цооногийн чөмгөн хүдрүүдийн эрдэс бүрдэл болон химийн найрлага төстэй болохыг харуулна. Хотгор ордын

Хүснэгт 2. Гадаргын чулуулаг дахь дагалдах элементүүдийн агууламж, мг/кг

№	Элемент	Хотгор-1	Хо-1	Хо-2.1	Хо-3.2	Хо-4	Хо-5	Хо-6	Хо-7
1	Cr	15.0	65.0	39.0	11.0	86.0	14.0	<10.0	14.0
2	Cu	<10	47.0	11.0	39.0	39.0	<10	22.0	<10
3	V	16.0	93.0	53.0	98.0	122.0	115.0	74.0	82.0
4	Zn	15.0	109.0	46.0	120.0	165.0	121.0	28.0	202.0
5	Ga	20.0	16.0	23.0	33.0	17.0	21.0	24.0	73.0
6	As	<5.0	96.0	24.0	77.0	70.0	10.0	9.0	42.0
7	Zr	410.0	426.0	640.0	172.0	147.0	387.0	120.0	805.0
8	Nb	9.0	43.0	65.0	25.0	44.0	30.0	19.0	31.0
9	Mo	4.0	18.0	5.0	13.0	10.0	12.0	5.0	2.0
10	Hf	5.0	3.0	13.0	3.0	4.0	8.0	2.0	13.0
11	Pb	36.0	39.0	62.0	20.0	32.0	90.0	28.0	302.0
12	Th	6.0	7.6	4.5	78.2	7.7	18.3	13.0	46.5
13	U	8.49	12.7	5.86	66.2	12.3	25.7	6.93	68.8

аргаар (Enraf Nonius Delft, 2θ =14-800, алхам = 0.05 (2°)), <Match!> Crystal Impact, X'Pert High Score Plus программ ашиглан хийлгэсэн.

ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

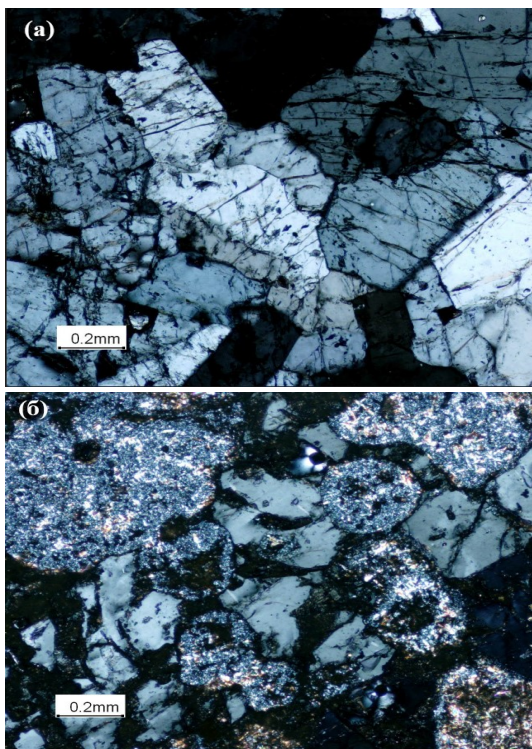
Хотгор ордын гадаргын чулуулгийн химийн бүрэлдэхүүн дэх үндсэн элементүүдийг тодорхойлж, шинжилгээний дүнг Хүснэгт 1-д үзүүлэв. Дээрх хүснэгтэнд үзүүлсэн үр дүнгээс харахад, Хотгор ордын гадаргын хүдэрт кали (4.64-11.75%), хөнгөн

гадаргын хүдрийн дээр дурдсан дээжүүдэд дагалдах элементүүдийн агууламжийг тодорхойлж, үр дүнг Хүснэгт 2 -д үзүүлэв. Шинжилгээний үр дүнгээс үзвэл дагалдах элементүүдээс циркони (120-805мг/кг) хамгийн өндөр агууламжтай илэрсэн. Энэ нь Хотгор ордын хүдэрт түүний бие даасан эрдэс циркон (ZrSiO₄) багавтар хэмжээтэй агуулагдаж байгааг харуулна. Хар тугалга, хүнцэл, цайр, зэс, хром, ванади, молибден зэрэг хүнд, хортой элементүүд янз бүрийн хэмжээтэй тодорхойлогдсон.

Хүснэгт 3. Гадаргын чулуулаг дахь ГХЭ-ийн агууламж, мг/кг

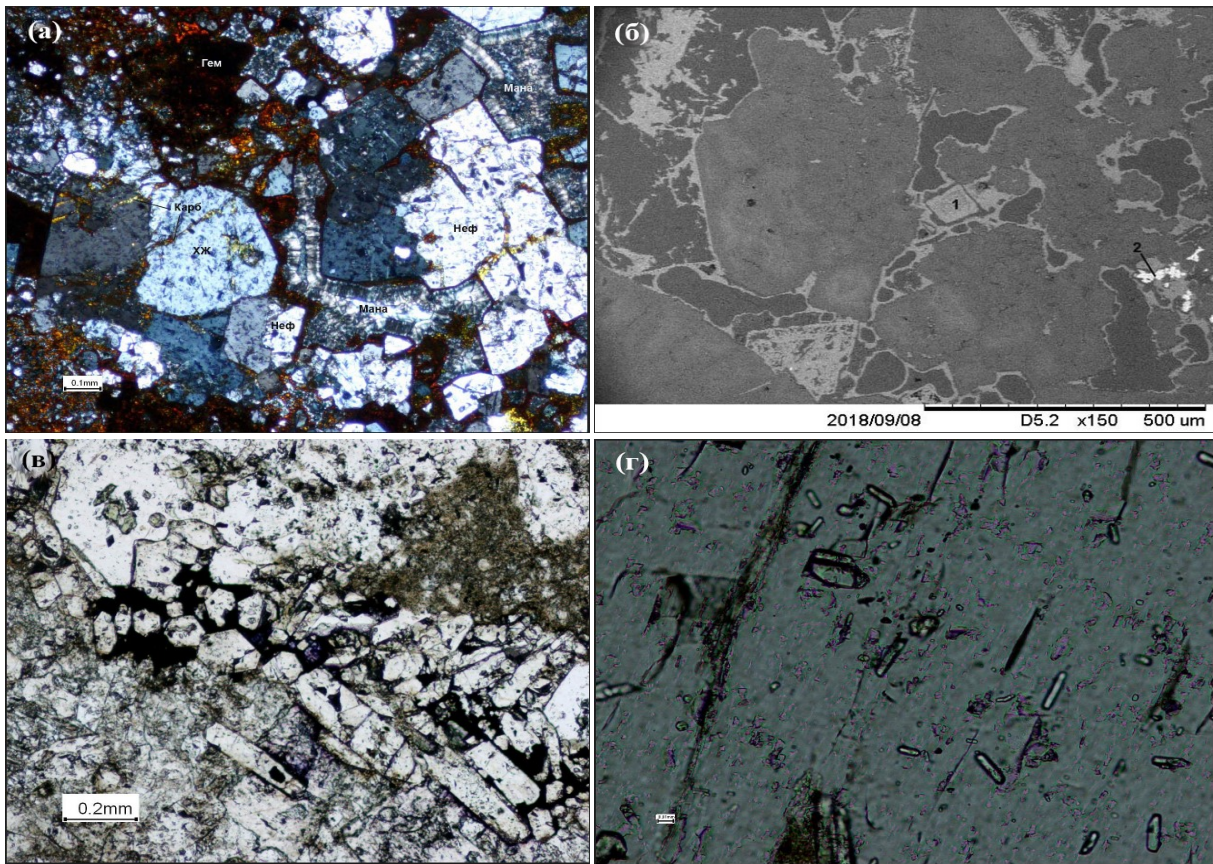
№	Элемент	Хотгор-1	Хо-1	Хо-2.1	Хо-3.2	Хо-4	Хо-5	Хо-6	Хо-7
1	Y	9.8	16.2	13.4	155.0	13.1	78.1	49.3	366.0
2	La	73.4	48.3	56.0	1380.0	39.8	578.0	251.0	4870.0
3	Ce	142.0	92.5	87.3	2430.0	73.5	956.0	474.0	7680.0
4	Pr	15.0	9.63	7.85	244.0	7.66	87.1	53.2	655.0
5	Nd	54.9	34.5	27.1	795.0	27.8	268.0	209.0	1940.0
6	Sm	9.4	6.7	5.4	114.0	5.1	38.4	33.5	241.0
7	Eu	5.04	6.37	6.19	37.4	5.34	13.5	17.4	63.3
8	Gd	6.62	5.45	4.23	97.5	4.62	28.7	26.7	186.0
9	Tb	0.82	0.77	0.59	11.6	0.64	3.78	2.97	22.8
10	Dy	2.46	3.36	2.47	34.1	2.97	11.8	8.56	62.0
11	Ho	0.40	0.64	0.47	5.94	0.58	2.12	1.49	10.8
12	Er	0.86	1.79	1.29	13.1	1.54	5.19	3.37	25.4
13	Tm	0.13	0.26	0.20	1.65	0.23	0.78	0.44	3.52
14	Yb	0.70	1.70	1.60	8.50	1.60	4.70	2.60	20.1
15	Lu	0.10	0.22	0.22	1.01	0.20	0.63	0.33	2.54
16	∑ГХЭ	321.63	228.39	214.31	5328.8	184.68	2115.2	1133.86	16148.46
	∑ГХЭ, %	0.0322	0.0228	0.0214	0.534	0.0185	0.212	0.113	1.615

ГХЭ-ийн хүдэр, баяжмалыг боловсруулах явцад асуудал дагуулдаг уран 5.86-68.8 мг/кг, тори 4.5-78.2 мг/кг хэмжээтэй илэрсэн байна. Өөрөөр хэлбэл, ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж ихтэй Хо-3.2 ба Хо-7 дээжүүдэд уран, торийн агууламж харьцангуй өндөр (Хүснэгт 2) байна. Гадаргын чулуулгийн дээжүүдэд ГХЭ-үүдийг нэг бүрчлэн тодорхойлсон шинжилгээний дүнг Хүснэгт 3-д үзүүлэв. Хотгор-1, Хо-1, Хо-2.1 ба Хо-4 дээжүүдэд ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж бага, 184.7-321.6 мг/кг, Хо-3.2, Хо-5, Хо-6, Хо-7 дээжүүдэд 1133.9-16148.5 мг/кг буюу харьцангуй их, ялангуяа Хо-7 дээжний хамгийн их байна. Өөрөөр хэлбэл, өмнө нь технологийн туршилтанд оруулсан цооногийн чөмгөн [13] дээжинд ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж 1.51% байсантай ойролцоо тодорхойлогдсон.



Зураг 1. (а) Сиенитийг бүрдүүлэгч хээрийн жоншны талстууд, (б) "Snow ball" бүтэц

ГХЭ-ийн тархалтаар хөнгөн буюу церийн бүлгийн элементүүд (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) давамгайлж, нийт газрын ховрын 86.2-95.7%-ийг эзэлж байна. Завсарын хүнд элементүүд (Gd, Tb, Dy)-ийн тархалт бага, нийт ГХЭ-ийн 1.7-4.5%, Y, Ho, Er, Tm, Yb ба Lu зэрэг иттрийн бүлгийн хүнд элементүүдийн тархалт 2.7-9.3% хүрч байна. Гадаргын чулуулагт иттрийн агууламж харьцангуй өндөр буюу 9.8-366 мг/кг. Энэ үр дүнгүүд Хотгор ордын гадаргын чулуулагт хүдрийн нэгэн адил хөнгөн ГХЭ-үүд давамгайлж, зарим чулуулагт ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж ба фосфор ч үйлдвэрлэлийн ач холбогдолтой бүрдэл болох түвшинд тодорхойлогдов. Мөн ГХЭ-үүдийг тээгч гол эрдэс нь апатит ($Ca_5[PO_4]_3[F,Cl]$) байхын зэрэгцээ бари, стронцитой изоморф халалцалд орсон апатит ($(Ca, Ba, Sr)_5[PO_4]_3[F,Cl]$) байх бүрэн боломжтой. Гадаргын хүдрийн электрон микроскоп (ЭМ)-ын ба SEM/EDX-ийн дүнгээр Хотгор-1, Хо-1, Хо-2.1 ба Хо-4 дээжүүдийн сиенит чулуулаг нь ягаавтар цайвар саарал өнгөтэй, түүний 95%-ийг хээрийн жоншны талстууд эзлэх ба циркон, апатит, хүдрийн эрдсийг бага агуулна. Хээрийн жонш 0.2-5.0мм хэмжээтэй, хавтгай талстуудыг үүсгэсэн ба циркон болон апатитын зөв хэлбэртэй ганц нэг мөхлөгүүд таарна (Зураг 1а). Хо-3.2 дээжний хээрийн жоншны талстууд хувиралд орж бутарч хэмхэрсэн, заримдаа метасоматит хувирлын нөлөөгөөр дугуйрсан тогтоц "Snow ball" бүтэц ажиглагдана (Зураг 1б). Энэ дээжийг фторапатит, пирохлор агуулсан цасан чулуу гэж геологич тэмдэглэсэн байсан. Электрон микроскопын шинжилгээгээр дурдсан эрдсүүд ажиглагдахгүй байгаа ч химийн шинжилгээгээр ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж харьцангуй өндөр ($\sum ГХЭ-0.534\%$) илэрсэн. Хо-5, Хо-7 дээжний нефелин сиенит нь хээрийн жонш, нефелинээс гадна биотит, апатит, магнетит, пиритын мөхлөгүүдээс тогтох ба карбонатит болон цахиурлаг хувиралд оржээ. Нефелин идиоморф, тэгш өнцөгт хавтгай хэлбэртэй, 0.1-0.5 мм хэмжээтэй. Апатит зөв хэлбэртэй, 0.05-0.20 мм хэмжээтэй чөлөөт



Зураг 2. Брекчилсэн хэсэг дэх нефелин–апатит- магнетит бүхий чулуулаг (а), SEM/EDX-ийн (б) зураг (1-магнетит, 2-барит), нефелин сиенитийн ЭМ-ын зураг (в), (г) нефелин дэх апатитын ялгарал(0.01- 0.05 мм)

мөхлөгүүдтэй байхаас гадна нефелин болон биотит дотор агуулагдаж байна. Энэхүү цементэлж тогтсон нефелинтэй хэсэгт апатитын агуулга харьцангуй элбэг 8% хүрнэ. Мөн апатиттай хамт барит, целестиний жижиг мөхлөгүүд үүсчээ (Зураг 2а). Магнетит зөв бус хэлбэртэй, мөхлөгүүдийн завсар зайг дүүргэж тогтсон ба исэлдэж гематитад хувирсны улмаас агуулагч чулуулгыг улаан хүрэн өнгөөр тортогдосон байна. Мөн пиритийн изометрлэг мөхлөгүүд багаар агуулагдана. Нефелин сиенит нь нарийн тоосорхог карбонатитад хэсэгчлэн түрэгдсэн

ба хамгийн сүүлийн үе шатанд түрж гарч ирсэн цахиурлаг уусмал чулуулгийн хөндий зайг манаар дүүргэж тогтжээ. Эдгээр дээжүүдэд ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж 0.212-1.615%, Хо-7-д кальци 3.96%, фосфор 1.30% илэрсэн нь ГХЭ-үүд апатитэд агуулагдаж байна гэж үзэх магадлалтайг дахин [13] харуулав. Хо-6 дээжийн нефелин сиенит нь бор хүрэн өнгөтэй эффузив чулуулгийн ксенолитуудыг ихээр агуулж брекчлэг бүтцийг (Зураг 2в) үүсгэсэн байна. Сиенитэд аксессуар байдлаар биотит, апатит, циркон, хүдрийн эрдсээс пирит, гематит агуулагдана. Апатит

Хүснэгт 4. Гадаргын чулуулгийн соронзлогдсон ба соронзлогдоогүй фракц дахь ГХЭ-ийн агууламж, мг/кг

Дээж	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	
Соронзон	1240	2160	229	759	104	32.8	87.2	10.1	
Соронзон бус	1290	2170	232	789	108	33.2	84.6	9.9	
Хо-3.2	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	∑ГХЭ	
	Соронзон	31.8	139	5.3	11.6	1.4	8.2	0.9	4820.3
Соронзон бус	32.6	139	5.4	12.5	1.4	8.2	0.9	4916.7	
Хо-7	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	
	Соронзон	4480	6900	646	1910	228	58.2	166	19.7
	Соронзон бус	4370	6850	640	1870	226	57.1	169	20.4
	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	∑ГХЭ	
	Соронзон	57.4	330	9.6	24.5	3.2	19.5	2.4	14854.5
	Соронзон бус	58.2	330	9.5	24.1	3.1	19.3	2.4	14649.0

ихэвчлэн хэлбэр дүрсээ олсон 0,05 мм хэмжээтэй (Зураг 3г) ба зарим мөхлөгүүд нефелиний талст дотор агуулагдана. Энэ дээжинд ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж харьцангуй их 0.113%, кальци 0.43%, фосфор 1.42%, бари 1%-иас, стронци 0.5%-иас их

дээжний 28.5-31% нь соронзлогдож, 68.9-71.5% нь соронзлогдохгүй үлдэж байв. Фракц тус бүрт ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж тодорхойлсон дүнг Хүснэгт 4-д үзүүлэв. Соронзлогдсон ба соронзлогдоогүй фракц тус бүрт ГХЭ-үүдийг нэг бүрчлэн тодорхойлсон

Хүснэгт 5. Чулуулгийн эх дээж ба соронзлогдоогүй фракц дахь эрдсүүд

№	Эрдсийн нэр	Хо-3.2	Соронзон бус	Хо-7	Соронзон бус
1	Хээрийн жонш (K)	70.99	64.89	40.09	47.84
2	Хээрийн жонш (Na)	-	-	19.57	17.18
3	Анортит (Ca[Al ₂ Si ₂ O ₈])	9.94	-	21.06	-
4	Микроклин (шаварлаг)	3.93	-	-	-
5	Апатит (Sr)	9.67	-	-	-
6	Апатит (Ca)	-	-	19.26	25.43
7	Кварц (SiO ₂)	5.45	-	-	5.99
8	Стронцианит (SrCO ₃)	-	20.77	-	-
9	Пирохлор	-	7.24	-	-
10	Флюорбритолит (Y)	-	7.08	-	-

тодорхойлогдсон үр дүнгээс үзвэл, апатитын кальци нь бари болон стронцийн ионтой изоморф халалцалд орсон байх шинж тэмдэг ажиглагдаж байна. Хотгор ордын гадаргын чулуулгийн ЭМ-ын ба SEM/EDX-ийн шинжилгээний үр дүнгээс үзэхэд, гадаргуугийн өгөршилд өртсөн сиенит ба брекчлэг бүтэц үүсгэсэн нефелин сиенит чулуулаг байна. Сиенит нь карбонатитээр бага зэрэг түрэгдсэн, 1-3% хүртэл апатит, фторапатит агуулсан барит, целестин, пириттэй, магнетит нь исэлдэн гематит үүсэж

шинжилгээний дүнгээс үзэхэд, ГХЭ-үүд нь соронзон ба соронзон бус шинж чанартай эрдсийн бүрэлдэхүүнд болон газрын ховор элементийн бие даасан эрдэс хэлбэрээр орших магадлалтай байна. Энэ туршилтанд орсон хоёр дээжинд рентгендифракцийн шинжилгээ хийхэд химийн найрлага нь ялгаатай апатитууд [Ca_{9.53}Sr_{0.4}Na_{0.09}Ce_{0.06}][PO₄]₃F_{2.18} ба Ca₁₀(PO₄)₆(OH, F, Cl)₂, фторапатит, пирохлор, фторбритолит, монацит зэрэг эрдсүүд байх магадлал ажиглагдсан.

Хүснэгт 6. Соронзлогдоогүй фракц дахь ГХЭ-ийн агууламж, мг/кг

Дээж	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb
Хо-3.2	1040	1750	170	576	71.2	40.6	80.8	9.06
Хо-7	5410	8130	717	2140	237	70.7	260	30.9
Дээж	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣГХЭ
Хо-3.2	25.2	101	4.18	9.77	1.12	6.1	0.83	3885.86
Хо-7	67.8	363	11.8	28.6	3.73	20.2	2.56	17493.3

чулуулгийг хүрэн өнгөөр тортогложээ. ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж ихтэй гэж үзсэн Хо-3.2 ба Хо-7 чулуулгийн дээжнүүдийн соронзлогдох шинж чанарыг хуурай соронзон ялгалтын аргаар туршсан. Туршилтанд 90 гаруй хувь нь 0.074 мм ширхэглэлтэй дээж ашигласан. Туршилтанд оруулсан нийт

Гадаргын чулуулгийн Хо-3.2, Хо-7 дээжийг нойтон соронзон ялгалтын аргаар туршихад соронзлогдсон фракцид нийт дээжний 2.5% орчим хэмжээний цэвэр магнетит (Fe₃O₄) ялгагдсан. Рентгенграмм дээр магнетит харагдаагүй боловч ЭМ-ын болон SEM/EDX-ийн шинжилгээгээр тодорхойлогдсон.

Хүснэгт 7. Хотгор ордын цооногийн хүдрийн химийн найрлага

№	Цооног	Үндсэн элементүүд, %										
		Al	Ca	Mg	K	Fe	Mn	P	Ti	Ba	Sr	ΣГХЭ
1	37	5.97	8.32	2.89	2.01	4.85	0.35	0.83	0.11	0.18	>0.5	2.00
2	45	6.96	6.31	1.83	3.50	3.52	0.32	0.69	0.12	0.40	>0.5	2.18
Дагалдах элементүүд, мг/кг												
№	Цооног	Be	Cu	Li	V	Zn	Co	Ga	Ge	As	Rb	Zr
1	37	18	47	37	192	300	12.9	54	8	31	52.4	309
2	45	15	<10	30	192	236	5.0	60	7	33	62.5	462
Дагалдах элементүүд, мг/кг												
№	Цооног	Nb	Mo	Cd	Sn	W	Hf	Ta	Pb	Bi	Th	U
1	37	30	25	1.0	3.0	8	5	1.0	149	1.5	44.5	88.9
2	45	44	5	0.9	3.0	41	10	1.1	95	1.0	102	135

Шинжилгээний үр дүнгүүд харилцан баталгаажиж байгаагийн илрэл юм. Эх дээж болон соронзлогдоогүй фракцид XRD шинжилгээгээр илэрсэн эрдсүүдийг харьцуулан Хүснэгт 5-д үзүүлэв. Туршилтын үр дүнгээс үзвэл, нойтон соронзон ялгалтын аргаар ГХЭ агуулаагүй натрийн хээрийн жонш, микроклин ба анортит зэрэг шлам үүсгэгчдийг зайлуулах магадлалтай байна.

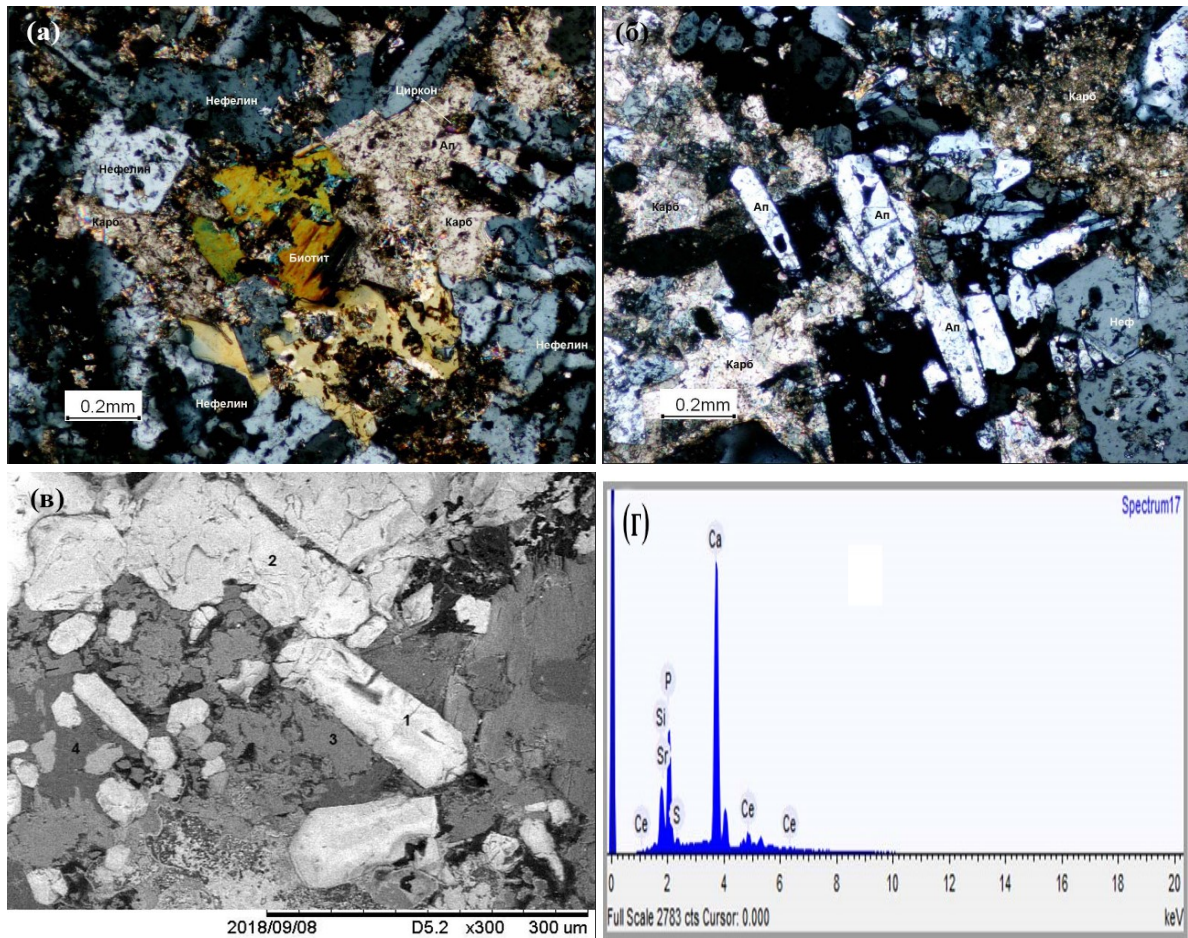
Соронзлогдоогүй фракцид рентгендифракцийн шинжилгээгээр цери агуулсан апатит илрээгүй нь үүнийг нотолно. Нойтон соронзон ялгалтын аргыг туршигдаа усны зарцуулалтыг хянаагүй. Харин Хо-7-ийн соронзлогдоогүй фракцид ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж 17493.3 мг/кг буюу 8.3%-иар нэмэгдсэн. Энд усны зарцуулалтыг бууруулсан боловч шламыг бүрэн зайлуулах усны хэмжээг тохируулаагүй байна.

Хүснэгт 8. Хотгор ордын гүний хүдэр дэх ГХЭ-ийн агууламж, мг/кг

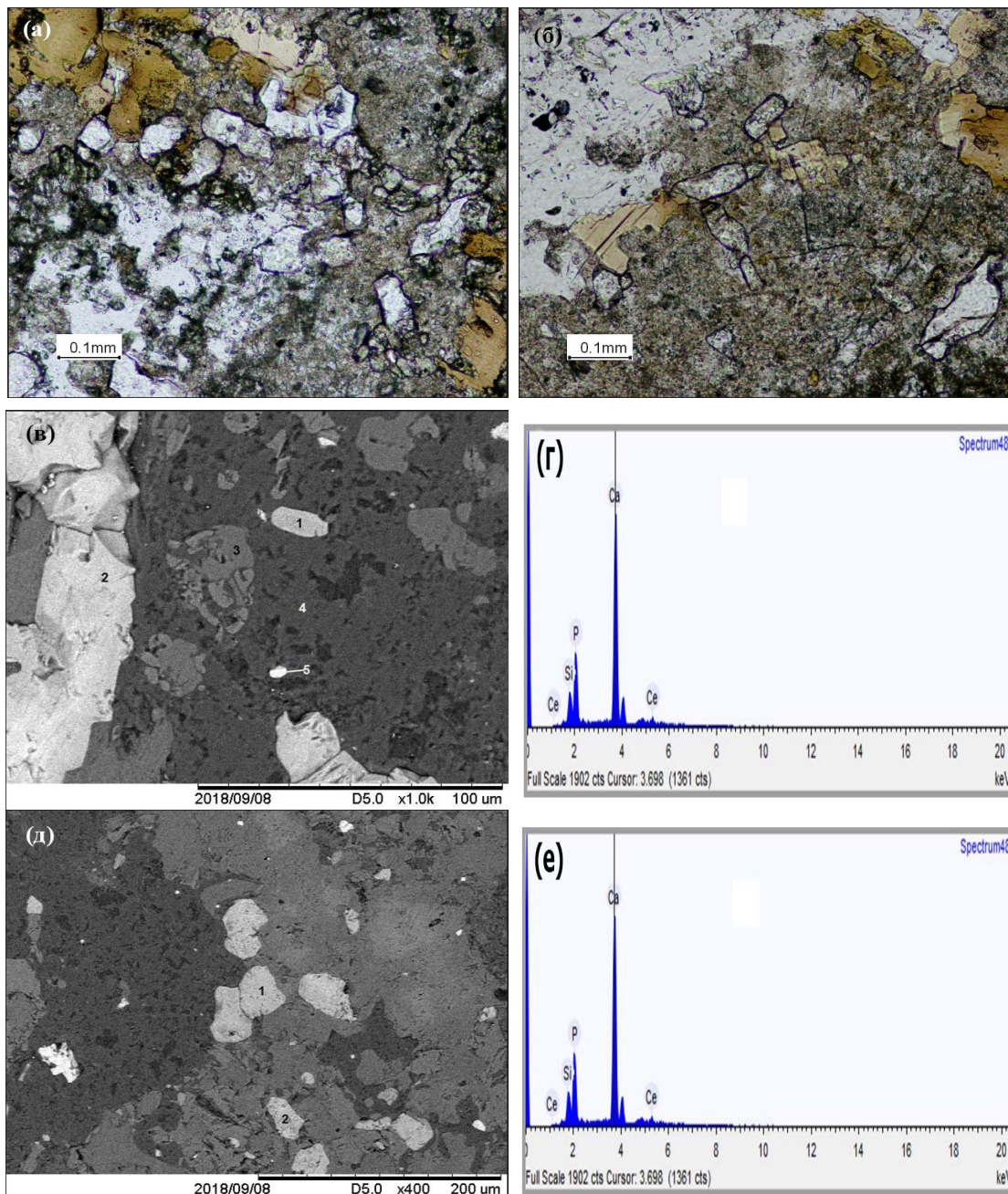
Цооног	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb
37	4450	9720	1000	3380	396	116	401	45.8
45	5170	10000	1000	3890	442	136	451	52.1
Цооног	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣГХЭ
37	86.5	416	14.7	33.7	4.31	22.1	2.79	20088.9
45	103	446	16.7	39.3	5.03	26.7	3.35	21781.2

Соронзлогдоогүй фракцид ГХЭ-ийг нэг бүрчлэн тодорхойлсон дүнг Хүснэгт 6-д үзүүлэв. Шинжилгээний дүнгээс үзвэл, Хо-3.2-ын соронзлогдоогүй фракц дахь ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж 3885.86 мг/кг буюу эх дээж дэх агууламж 27%-иар буурсан нь ГХЭ агуулсан $[Ca_{9.53}Sr_{0.4}Na_{0.09}Ce_{0.06}][PO_4]_3F_{2.18}$ апатитыг шламтай хамт алдсан байх магадлалтай.

Хэрэв технологийн туршилтанд нойтон соронзон ялгалтын аргыг хэрэглэвэл усны зарцуулалтын тохиромжтой хэмжээг нарийвчлан тогтоосны дүнд соронзон шинж чанартай ГХЭ агуулаагүй эрдсийг зайлуулахын зэрэгцээ шлам үүсгэгч шаварлаг эрдсүүдийн агууламжийг шаардлагатай хэмжээнд хүртэл бууруулах боломж бүрдэнэ. Хотгор ордын 37 ба 45-р цооногийн хүдрийн химийн найрлагыг



Зураг 3. Хотгорын 45-р цооногийн хүдрийн карбонатаар түрэгдсэн нефелин, биотит (а), апатит, фторапатит (б) ЭМ ба (в,г) SEM/EDX (1-Се-апатит, 2-Sr-апатит, 3-нефелин: Na, K, Ca, Si, Ti, Fe, 4-нефелин: Na, Al, Si, Ca)



Зураг 4. Хотгорын 37-р цооногийн хүдрийн карбонатитад хувирсан, түрэгдсэн хэсэг дэх апатит, фторapatит, биотит ЭМ-ын зураг (а,б), (в,г) SEM/EDX (1-Ce-apatит, 2-Sr-фторapatит, 3-амфибол, 4-хээрийн жонш, 5-пирит), (д,е)SEM/EDX (1-фторapatит, 2-Ce-фторapatит)

Хүснэгт 7-д үзүүлэв. Шинжилгээний дүн (Хүснэгт 7)-ээс харахад Хотгор ордын гүний хүдэрт кали (2-3.5%), хөнгөн цагаан (6-7%), төмөр (3.5-4.9%), кальци (6.3-8.3%), магни (1.8-2.9%) ба фосфор (0.7-0.8%)-ын агууламж хамгийн их, манган, титан багавтар хэмжээтэй агуулагдаж байна. Гүнийн хүдэрт ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж харьцангуй өндөр, 2-2.18% илэрсэн нь үйлдвэрлэлийн ач холбогдолтой хэмжээнд байна. ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж өмнө судалсан технологийн туршилтын дээжний [13] болон гадаргын хүдрийн агууламжаас 0.5%-иар их байгаа нь гадаргын ба цооногийн чөмгөн хүдрүүдийн эрдэс бүрдэл болон химийн найрлага төстэй байна. Гүний хүдэрт дагалдах

элементүүдээс циркони (309-462 мг/кг), цайр (236-300 мг/кг) харьцангуй өндөр агууламжтай илэрсэн нь Хотгор ордын гүний хүдэрт тэдгээрийн бие даасан эрдэс циркон ($ZrSiO_4$), галенит багавтар хэмжээтэй агуулагдаж байгааг харуулна. Хар тугалга, хүнцэл, зэс, ванади, молибден, ниоби, гафни зэрэг хүнд, хортой элементүүд янз бүрийн хэмжээтэй тодорхойлогдсон. Мөн уран 88.9-135 мг/кг, тори 44.5-102 мг/кг хэмжээтэй илэрсэн нь цацраг идэвхит уран, торийн агууламж ордын гүн рүү ихсэх хандлагатайг илтгэнэ. Гүний хүдэрт ГХЭ-үүдийг нэг бүрчлэн тодорхойлсон шинжилгээний дүнг Хүснэгт 8-д үзүүлэв. ГХЭ-ийн тархалтаар церийн бүлгийн элементүүд (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) давамгайлж, нийт

газрын ховрын 95%, завсарын хүнд элементүүд (Gd, Tb, Dy) 2.5%, Y, Ho, Er, Tm, Yb ба Lu зэрэг хүнд элементүүд 2.5%-ийг тус тус эзэлж байна. Гүний хүдэрт иттри 416-446 мг/кг агууламжтай тодорхойлогдов.

Гүний 45-р цооногийн хүдрийн ЭМ ба SEM/EDX-ийн дүнг *Зураг 3*-т үзүүлэв. Чулуулагт нефелин 50%, биотит 15%, апатит 5%, фторапатит 5% , бага хэмжээгээр флюорит үүссэн ба карбонат хувирал болсон хэсэгт апатитын идиоморф сунасан талстууд, фторапатит, флюорит, целестин зэрэг эрдсүүд (*Зураг 3а,б*) хамт таарна. Апатитын мөхлөгийн хэмжээ 0.05-0.10мм, SEM/EDX-ийн дүнгээр Се агуулсан апатит илэрсэн (*Зураг 3в,г*).

Гүний 37-р цооногийн хүдрийн ЭМ ба SEM/EDX-ийн дүнг *Зураг 4*-т харуулав. Хүдрийн нефелин сиенит чулуулаг нь нефелин 30%, биотит 20%, амфибол 15%, акцессор эрдсээс апатит (фторапатит), флюорит 15%, хүдрийн эрдсээс 10%-ийн пиритээс тогтсон. Хоёрдогчоор нарийн ширхэгтэй карбонат эрдсүүд 10% агуулагдана. Биотит 1-2 мм хэмжээтэй, зөв биш хязгаартай. Апатит харьцангуй том 0.02-0.5 мм ширхэгтэй (*Зураг 4а,б*). Энэ цооногийн хүдэрт SEM/EDX шинжилгээгээр Се агуулсан апатит (фторапатит) тодорхойлогдсон (*Зураг 4в,г ба д,е*). Эдгээр хүдрийн дээжүүдэд ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж 2-2.2% буюу харьцангуй өндөр байгаа нь церийн бүлгийн газрын ховор элементийн баяжмал гаргаж авах, баяжмалыг боловсруулан ГХЭ-ийн нийлбэр оксид үйлдвэрлэх түүхий эдээр ашиглах бүрэн боломжтой.

ДҮГНЭЛТ

Хотгор ордын гадаргын болон гүний хүдрийн сиенит, нефелин сиенит чулуулаг нь хээрийн жонш, биотит, амфибол болон апатит, фторапатит, флюорит, магнетит, пирит зэрэг эрдсүүд агуулах ба гадаргын чулуулагт ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж 0.019-1.62%, ГХЭ-ийг тээгч гол эрдэс нь апатит ба стронци, баритай изоморф солилцолд орсон апатит, тэдгээр дэх газрын ховор элементийн 86-96%-ийг хөнгөн буюу церийн бүлгийн ГХЭ-үүд эзэлж байна. Гүний хүдэрт ГХЭ-ийн нийлбэр агууламж 2.0-2.2%, ГХЭ-ийг тээгч гол эрдэс нь апатит (фторапатит), нийт ГХЭ-ийн 95%-ийг церийн бүлгийн элементүүд бүрдүүлж байна. Апатит (фторапатит) эрдсийн ширхэглэл 0.01-0.50 мм хэмжээтэй тархсан байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

1. C.K. Gupta, N. Krishnamurthy. Extractive metallurgy of rare earths. *International Materials Reviews* 37 (5). 1992. p.197–248.
2. D.N. Trifonov, *The Rare-Earth Elements*. Macmillan, New York. 1963.
3. C.K. Gupta, N. Krishnamurthy, Extractive Metallurgy of Rare Earths. *CRC Press, Boca Raton, Florida*. 2005.
4. S. Vijayan, A.J. Melnyk, R.D. Singh, K. Nuttall. Rare earths: their mining, processing, and growing industrial usage. *Mining Engineering* 41. 1989. p.13–18.
5. S.I. Levy. *The Rare Earths*, second ed. Edward Arnold, & Co., London. 1924.
6. R. Chi, S. Xu, G. Zhu, J. Xu, X. Qiu. Beneficiation of rare earth ore in china. In: *Metals, Light*. (Ed.), *Technical Sessions at the 130th TMS Annual Meeting. TMS Aluminum Committee*, New Orleans, 2001. p. 1159–1165.
7. J. Zhang, C. Edwards. A review of rare earth mineral processing technology. In: *44th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*. CIM, Ottawa, 2012. p.79–102.
8. J.M. Crow. 13 exotic elements we can't live without. In: *The New Scientist*, vol. 1 (2817). London, UK. 2011. p. 36-41.
9. L. Meyer, B. Bras. Rare earth metal recycling. In: *IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Chicago, IL, USA, 2011. pp. 1–6.
10. C. Preinfalk, G. Morteani, The industrial applications of rare earth elements. In: Moller, P., Cerny, P., Saupe, F. (Eds.), *Lanthanides, Tantalum and Niobium: Mineralogy, Geochemistry, Characteristics of Primary Ore Deposits, Prospecting, Processing and Applications*. *Society for Geology Applied to Mineral Deposits*, Berlin, DE, 1986. p. 359–370.
11. Z. Chen. Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. *Journal of Rare Earths* 29 (1). 2011. p. 1–6.
12. M. Pitts. Endangered elements. In: *The Chemical Engineer*. Rugby, UK, Issue October, 2011. p. 48–51.
13. Г.Бурмаа, С.Ален, Т.Аззаяа, Ш.Нямдэлгэр. Газрын ховор элемент агуулсан хүдэр, эрдсийн шинж чанарын судалгаа. УБ. ШУТИС, ХШУС. Эрдэм шинжилгээний бүтээлийн эмхэтгэл. №5/232, 2018. х.5-11.

Mineral and ore characterization of the rare earth element from Khotgor deposit

G.Burmaa*, S.Alen, T.Azzaya

Institute of Chemistry and Chemical Technology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 13330, Mongolia

*E-mail: burmaa.icct@gmail.com

Received: 20.10.2018

Revised: 23.10.2018

Accepted: 05.11.2018

Abstract: Although many new deposits of rare earth elements (REEs) are being discovered, the technical and technological knowledge on the separation of REEs from its ore by concentrating procedure and concentrate treatment are limited. In Mongolia, doing research on the chemical technological characteristics of the REEs mineral and ore would have been a great importance for the academic research knowledge and creation of new documents with respect to REEs. Moreover, it can be efficiently resulted to socio-economic issue in our country. The surface rocks and ore from Khotgor deposit located in Umnugobi province were studied by electron microscopy, SEM/EDX and X-ray diffraction method. As a result, the rocks are composed to sienite protracted by carbonatite, nepheline-sienite rocks with breccially-formed, apatite (flourapatite) with 1-3%, barite, celestine, pyrite and magnetite, respectively. In the rock, REEs's total content was about 0.02-1.6%, and its 86.2-95.7% for the cerium group elements. A nepheline sienite and sienite that includes apatite, barite, celestine, pyrite and magnetite were composed to the ore. Total content of REEs in this ore was 2.18% with light REEs about 95%. This study summarized the chemical composition of rocks, ores and minerals. Furthermore, the contents of REEs and characterization of the carrier minerals and other accompanied minerals were presented.

Keywords: *nepheline, sienite, apatite, flourapatite*

© The Author(s). 2018 **Open Access** This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

DOI: <https://doi.org/10.5564/bicct.v0i5.1068>