

Солонгын Саран^{1✉}, Насан-Очирын Эрдэнэ-Очир²¹ШУТИС, Хэрэглээний шинжлэх ухааны сургууль

Монгол улс, Улаанбаатар-14191, Бага тойруу,

Шинжлэх ухаан технологийн их сургууль I байр

²Шинжлэх ухааны академийн Археологийн хүрээлэн

Монгол улс, Улаанбаатар-13330, Энхтайвны өргөн чөлөө,

Шинжлэх ухааны академийн хүрээлэнгүүдийн нэгдсэн I байр

**Хархул хааны балгасын буддын шашны сүмийн малтлагаас
илэрсэн барилгын хэрэглэгдэхүүнийг материал судлалын аргаар судалсан нь¹**

Хураангуй. 2024-2025 онд “Өв соёлын голомт” төслийн хүрээнд Архангай аймгийн Эрдэнэмандал сумын нутагт орших Хархул хааны балгас хэмээх эртний хотын Буддын шашны сүм хийдийн малтлага, хээрийн судалгааны ажлын хүрээнд барилгын материал хэрэглэгдэхүүний түүхий эд, үйлдвэрлэсэн газар, эцсийн бүтээгдэхүүн гэсэн үйлдвэрлэлийн гинжин дэс дарааллыг тогтоох, “chaîne opératoire” хэмээх арга зүйн дагуу Тойрмын нуур, Дүнгэнэдэг нуурын шаврын орд, барилгын материал шатаах зуух болон 1, 2-р сүмийн барилгыг сонгон тоосго, дээврийн ваар, шавардлага, шохойн зуурмагийг материал судлалын аргаар судлав. Археологийн судалгааны зэрэгцээ барилгын хэрэглэгдэхүүн дээр салбар дундын судалгааг гүйцэтгэж материалд агуулагдаж буй эрдэс, нэгдлүүдийн найрлагыг тодорхойлох замаар түүхий эд, үйлдвэрлэсэн технологийг сэргээн тогтоосон нь Монголын эртний хот суурины судалгаанд шинэ үр дүн болж байна.

Түлхүүр үг: Эртний барилгын материал, тоосго, дээврийн ваар, шавардлага, паалан, материал судлал, XRD, FTIR, Raman

Saran Solongo^{1✉}, Erdene-Ochir Nasan-Ochir²¹School of Applied Sciences,

Mongolian University of Science and Technology

Baga Toiruu, Ulaanbaatar-14191, Mongolia

²Institute of Archaeology

Mongolian Academy of Sciences Building-1

Peace avenue, Ulaanbaatar-13330, Mongolia

**Archaeometric study of the building materials
from the buddhist temples at the Kharkhul khaany balgas site**

Abstract. Archaeological artefacts unearthed from Kharkhul Khaany Balgas site were investigated using methods specific to materials science (X-ray diffraction analysis (XRD), Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Raman spectroscopy) in order to detect the materials choices and technology following the “chaîne opératoire conceptual framework” that established technology as a phased process. The production technology Yinzhaio is assumed as the kilns were discovered at the site. Clay samples from two clay deposits were analyzed along with end products such as grey bricks, green glazed roof tiles, lime mortar and lime plaster, and rammed earth from two Buddhist temple buildings. Analysis using XRD and FTIR to reconstruct the technology and to determine the provenance gave insights into the clay sources used by the ancient people, the technology for making the architectural clay ceramics at the Kharkhul Khaany Balgas site.

Keywords: Archaeological building ceramic, clay brick, roof tile, mortar, glaze, chaîne opératoire, materials science, XRD, FTIR, Raman

¹ Энэхүү өгүүлийг Голомт банк, ШУА-ийн Археологийн хүрээлэн, МБШТГандантэгчэнлин хийдийн Эрдэм соёлын хүрээлэнгийн хамтран хэрэгжүүлсэн “Өв соёлын голомт” эрдэм шинжилгээний төслийн Хархул хааны балгасын археологийн судалгааны хүрээнд гүйцэтгэв.

1. Удиртгал

XIII зууны Монголын Эзэнт гүрний нийслэл Хархорум хоттой хамгийн ойр, түүнтэй нэгэн цаг үед холбогдох, хот төлөвлөлтийн дагуу баригдсан, гоёмсог барилга байгууламж, олон өргөн чөлөө бүхий нүсэр зохион байгуулалттай Хархул хааны балгас хэмээх нэр нь үл мэдэгдэх эртний томоохон хотын туурьд 2024 оноос эхлэн Голомт банкны “Өв соёлын голомт” төслийн хүрээнд ШУА-ийн Археологийн хүрээлэн, МБШТ Гандантэгчэнлин хийдийн Эрдэм соёлын хүрээлэнгийн хамтарсан үндэсний археологийн судалгааны баг малтлага судалгаа явуулсан нь эрдэм шинжилгээний хувьд чухал ажил болсныг тэмдэглэх хэрэгтэй. Тус төслийн хүрээнд эртний хотын хоймор хэсэгт орших зарим барилга байгууламжийн туурьд малтлага хийж, анх удаа XIII зууны үед холбогдох Буддын шашны томоохон хийдийн туурийг илрүүлсэн нь нээлтийн чанартай судалгаа болсон юм (Эрдэнэ-Очир, Мөнхбаяр 2024).

Эртний барилгын материалыг хэзээ, хаана, хэрхэн үйлдвэрлэснийг судалдаг археометрийн судалгаа эрчимтэй хөгжиж, байгалийн шинжилгээний аргууд улам нарийссан. Монголын эртний хот суурины барилгын материалын технологийн судалгаанд он цагийн хүрээг тогтооход эдгээр аргыг ашиглаж, тухайлбал эртний нийслэл Хархорумын сүмийн барилгын материалын насыг термолюминесценци болон фото өдөөлтийн люминесценцийн аргаар тогтоож (Solongo, Wagner et al. 2006; Solongo, Tengis et al. 2020) эртний барилгын нас, барилгажилтын үе шат, түүхийг баримтаар тогтоож иржээ.

Археологийн судалгаанд түүхий эд, үйлдвэрлэсэн газар, эцсийн бүтээгдэхүүн гэсэн үйлдвэрлэлийн гинжин дэс дарааллыг тогтоох “*chaîne opératoire*” (Audouze 2002) хэмээх арга зүйг өргөн хэрэглэн эртний материалд агуулагдах эрдэс, нэгдлүүдийн найрлагыг ашигласан түүхий эд, үйлдвэрлэсэн технологийг тогтоодог (Tite 2008). Монголд энэ чиглэлийн судалгаа (Solongo, Tengis et al. 2023) хийгдсэн ч Монголын эртний хот суурины барилгын технологийн судалгааг археологи болон материал судлалын салбар дундын судалгааны хэлбэрээр явуулах нь нэн шаардлагатай, шинэлэг зүйл болох нь тодорхой байна.

Эртний барилгын тоосго хийх технологийг авч үзвэл түүхий эд болох шаварт ус нэмж улмаар агшилтаас шалтгаалан ан цав үүсэхийг багасгахын тулд шаварт тодорхой хувь хэмжээгээр элс нэмдэг. Ингэхдээ, том ширхэгтэй элс бат бэх болгодог бол нарийн ширхэгтэй нь шавар дүүргэгчийн үүрэг гүйцэтгэдэг. Түүхий шавар эдийг каолинит, монтмориллонит болон иллит гэж ялгадаг (Gliozzo 2020) ба шавар нь цахиурын исэл (SiO_2), хөнгөн

цагааны исэл (Al_2O_3) болон бусад металлын исэл агуулдаг. Эдгээр металлын исэл (flux) нь шаврын шатаалтын температурт нөлөөлдөг. Шаврыг 500°C -аас өндөр температурт шатаахад шаврын дегидраци, дегидроксидаци болон кальцитын задрал үе шаттай явагддаг бөгөөд $700\text{--}800^\circ\text{C}$ -д шатаахад кальцит, доломит задарч шинэ эрдэс үүсдэг ба 950°C -д смектитын дегидроксидаци явагддаг.

Шатаалтын температур 867°C хүрэхэд β -кварц тримидит болж хувирдаг ба 1470°C -т β -крстобалит болж хувирдаг. Харин 1000°C –ээс их температурт кварц нь найрлагаас хамааран анортит, волластонит, геленит зэрэг шинэ фазыг үүсгэдэг (Cultrone, Sebastián et al. 2004). Жоншийг хоёр үндсэн бүлэгт ангилдаг. К-жонш ($\text{K,Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ болон плагиоклас $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ - $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ (албит болон анортит), харьцангуй өндөр температурт хайлах албит 1100°C ; К-жонш 1150°C ; анортит 1550°C байдаг.

“Шохойтой” (карбонатлаг буюу CaCO_3 -аар баялаг) ба “шохойгүй” (карбонатлаг бус буюу CaCO_3 -аар бага) керамик эдлэлийн хоорондох ялгаа нь шатаах явцад үүсдэг эрдсийн хувиралт өөр температурт явагддаг. Карбонатаар баялаг шавар нь карбонат багатай шаварлаг материалаас нам температурт ($\sim 800^\circ\text{C}$) шатдаг, учир нь Ca, Mg нь флюкс (flux)-ийн үүрэг гүйцэтгэдэг (Gliozzo 2020). Төмрийн исэл Fe^{3+} (гематит) болон Fe^{2+} (магнетит) үүсэхийн тулд исэлдүүлэх болон ангижруулах нөхцөл шаардлагатай. Нөгөөтгээгүүр, шатаалтын эцсийн шатанд усаар хөргөж Fe^{3+} нь Fe^{2+} болж тоосго хөх саарал өнгөтэй болдог бөгөөд температур 950°C -аас их болоход хөх өнгөтэй тоосго нь ангижруулах, харин улаан өнгөтэй тоосго нь исэлдүүлэх орчинд шатсаныг илтгэдэг.

Керамик материалд буй эрдэс болон шатаалтын явцад үүсэх шинэ эрдэс фазыг материал судлалын орчин үеийн аргаар судалдаг билээ. Тухайлбал, рентген дифракци (XRD, X-ray diffraction analysis), рентген флюоресценци (XRF, X-ray fluorescence), электрон микроскопи (SEM/EDX, Scanning Electron Microscopy), нил улаан гэрлийн спектрометри (FTIR, Fourier-Transform Infrared Spectroscopy), раман спектроскопи (Raman spectroscopy), дулааны гравиметри (termogravimetry)-г өргөнөөр ашигладаг ба нэг аргаар судлах хангалтгүй учир олон аргыг хослуулан судлах оновчтой болдог (Ricci, Caneve et al. 2016; Xu, Ma et al. 2019; Saran et al. 2020; Solongo, Franken et al. 2020).

2024-2025 онд “Өв соёлын голомт” төслийн хүрээнд археологийн хээрийн шинжилгээний анги Архангай аймгийн Эрдэнэмандал сумын нутагт орших Хархул хааны балгасын Буддын шашны

сүм хийдийн малтлага судалгааг гүйцэтгэж, бүтэц зохион байгуулалт, он цагийг тодорхойлж, олон төрлийн барилгын материал, баялаг хэрэглэгдэхүүн шинээр илрүүлэн судалж байна. Энэ ажилд Сүм 1, Сүм 2 -ын шавар, шавардлага, тоосго, дээврийн хавтангийн технологийг харьцуулан судлахдаа материал судлалын орчин үеийн олон аргыг ашиглан эртний технологийг тайлахыг зорив.

2. Судалгааны арга зүй, судалгааны дээж, багаж төхөөрөмж

2.1. Судалгааны арга зүй

Зөвхөн археологийн судалгааны арга зүйн хүрээнд материалын насжилт, гарал үүсэл болон технологийн талаарх нарийн мэдээллийг гарган авах боломжгүй байдаг. Археометрийн судалгаа (Artoli 2010) нь эртний материалыг хэзээ, хаана, хэрхэн хийснийг тодорхойлох боломжийг олгодог. Бидний хамгийн сайн мэдэх арга нь тухайлбал, олдворын насыг радиокарбоны арга юм. Нас тогтоох зорилгоор радиокарбоны төлбөртэй хэмжилт хийлгэх нь элбэг байдаг. Ихэнх тохиолдол цөөн тооны хэмжилт хийж, магадлалтай болон магадлалгүй гэсэн таамаглалын хүрээнд тайлбар огт хийхгүй байх нь элбэг. Гэтэл ^{14}C нь сансрын цацраг болон азотын атомын харилцан үйлчлэлээр

агаар мандлын дээд давхаргад үүсдэг космоген нуклид бөгөөд нарны идэвхжил ихсэхэд ^{14}C -ийн үйлдвэрлэл багасдаг. Тухайлбал НТ 1052, НТ 1279 онд модны үнсэнд аномали бүртгэгдсэн байдаг (Scifo, Abi Nassif et al. 2024) ба хэрэв өгүүлэлд радиокарбоны мэдээллийг тайлбарлахгүй бол мэдээлэл алдагддаг. Хүний ясны хадгалалтаас шалтгаалан ^{14}C алдаатай болдог, тухайлбал “I12664” кодтой хүний ясны ^{14}C нь НТ 1-2-р зууны үед буюу булшны зарим олдвороос хойш 400-500 жилийн дараах үед байсан тухай мэдээлжээ (Regev, Boaretto et al. 2025). Ийм тохиолдолд “pre-screening before ^{14}C analysis” хийх нь зохимжтой байдаг. Хэрэв FTIR спектрт коллаген бүртгэвэл (амид I, амид II ба гидроксипролин) нас тогтоох боломжтойг харуулдаг.

Нөгөөтгээгүүр, физик болон материал судлалын эрдэмтэд археологийн материалын судалгаа явуулж тухайн материалыг хэзээ, хаана, хэрхэн үйлдвэрлэснийг судлах нь өрөөсгөл болох магадлалтайгаас гадна дээжийн сонголт (ваар савны судалгаанд ямар хэлбэртэй ваарыг төлөөлүүлж сонгох г.м.), орон нутгийн болон гаднын дээж сонгох, ялгах г.м. алдаатай болдог. Мөн технологи, гарал үүсэл, ангиллын асуултаас давж томьёолж болох олон асуултыг тодорхойлоход төвөгтэй байдаг. Иймд, тус



Зураг 1. “chaîne opératoire framework” буюу түүхийн эдийн эх үүсвэр, үйлдвэрлэсэн газар, Сүм 1, 2-ын олдвор бүхий үйлдвэрлэлийн гинжсин үйл ажиллагааны хүрээ

тусын арга зүйг хослуулан нэг талаас материал судлаачид материал судлалд ашигладаг орчин үеийн шинэ арга техникийг ашиглан, нөгөө талаас археологичид эд материалын нотлох баримтыг түүхийн төлөвт оруулж, салбар дундын хамтарсан археометрийн судалгаа явуулах нь асуудлыг том зургаар харж шийдэхэд нэн тустай.

2025 онд Хархул хааны балгасын малтлагаар эртний гар урлаачдын ашигласан түүхий эд, үйлдвэрлэсэн газар, эцсийн бүтээгдэхүүн гэсэн үйлдвэрлэлийн аргын дэс дарааллыг тогтоох “*chaîne opératoire*” (Audouze 2002) хэмээх арга зүйн дагуу олж тогтоож, орчин үеийн аналитик аргуудтай хослуулан барилгын материалын гарал үүслийг судлав. Шаврын орд, барилгын материал үйлдвэрлэх зуух, сүмийн барилгыг сонгон түүхий эд, шавар, дэлдэж дагтаршуулсан хөрс, шавардлага, хөх тоосго, улаан болон хөх дээврийн ваар, дээврийн ваарын ногоон паалан бүхий олон төрлийн материал цуглуулан судалгааны эргэлтэд орууллаа (Зураг. 1). 1-р зурагт Тойрмын нуур, Дүнгэнэдэг нуур гэсэн шаврын орд, Хархул хааны балгасын “сүм 1”, “сүм 2” барилга, “mantou” (Kerr and Wood 2004) зуухны байршлыг харуулав.

Урьд өмнө нь Хархорумд 14 “мантуу” зуух илрүүлэн эртний архитектурын барилгын хөх, улаан тоосго, дээврийн хавтан болон шавар эдлэл үйлдвэрлэдэг гар урлалын хот байсан гэж үзсэн (Hüttel and Erdenebat 2011) бол Хархул хааны балгас дахь барилгын материалыг мөн л “мантуу” зууханд үйлдвэрлэж байсныг тогтоожээ (Reichert, Erdene-Ochir et al. 2022; Эрдэнэ-Очир, Мөнхбаяр et al. 2024).

Гарал үүслийн судалгаа буюу хаана үйлдвэрлэснийг тогтооход арга зүйн хувьд олон өөр аргаар ашигладаг. Тухайлбал,

- түүхий шаврыг эцсийн бүтээгдэхүүн буюу археологийн керамик олдвор, ваар сав, тоосго, дээврийн ваартай харьцуулан судлах (Gliozzo 2020; Solongo, Tengis et al. 2020);
- шаврыг 500, 700, 900 °C-д лабораторийн нөхцөлд шатааж керамик олдвортой харьцуулан гарал үүслийг тогтоох (Solongo, Tengis et al. 2020);
- олон тооны шавар ваарын найрлагыг тогтоох замаар мэдээлэл гарган авдаг (Tite 2008); энэ аргаар олон тооны керамик олдворт боловсруулалт хийх нь тохиромжтой.

Технологийг тайлахад түүхий шаврыг эцсийн бүтээгдэхүүн болгох шавардлага (тухайлбал, шохойн чулуу, ус, дүүргэгч, органик хольцын холимог (Ma 2018) болон тоосго, дээврийн ваартай харьцуулан судалдаг.

Шатаагаагүй шохойн зуурмаг, шавардлагын найрлагыг рентген флюоресценци, SEM-EDS, TGA болон рентген дифракци, нил улаан гэрлийн

спектрт илэрсэн фазад анализ (Saran et al. 2020) хийх замаар судалдаг.

Шатаасан материалын шатаалтын температурыг тогтоох арга зүйг ашиглан (Cultrone, Sebastián et al. 2004) барилгын материалыг үйлдвэрлэсэн технологийг судлахад рентген дифракци болон нил улаан гэрлийн спектрт илэрсэн фазад анализ хийх замаар, нөгөөтээгүүр нил улаан гэрлийн спектрт шаврын үндсэн пикийн шилжилтээр шатаалтын температурын талаар мэдээлэл гарган олж авдаг.

2.2. Судалгааны дээж

Шинжилгээний дээжийг Тойрмын нуур, Дүнгэнэдэг нуур гэсэн шаврын ордоос авсан болно. Хархорум хоттой төстэйгөөр олон тооны “мантуун” илрүүлсэн бөгөөд хотын болон зуухны тоосгоны ижил төстэй байдлаас харахад эдгээр зууханд Хархул хааны балгас дахь архитектурын барилгын материалыг үйлдвэрлэжээ. Барилгын материал болох дэлдсэн хөрс, шавардлага, тоосго, дээврийн ваарыг “сүм 1”, “сүм 2” барилгаас авсан тухай мэдээллийг дор хавсаргав (Хүснэгт 1).

2.3. Туршилтын багаж төхөөрөмж

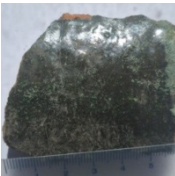
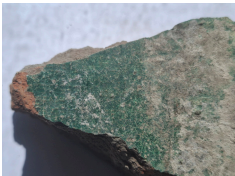
Шавар материалын технологийг тайлахад ганц аргаар судлах нь хангалтгүй учир шавар материалд буй фазын анализ хийхэд өргөнөөр ашигладаг рентген дифракци, органик бодисыг илрүүлэхэд ашигладаг нил улаан гэрлийн спектроскопи, раман спектрометрийн хэмжилтийг хийв.

Рентген дифракци. Нунтагласан дээжүүдийн талст бүтэц, фазын бүрэлдэхүүнийг МУИС-ийн дундын лабораторид Miniflex 300/C600 маркийн рентген дифрактометр багаж ашиглан тодорхойлсон. Хэмжилтийг зэс катодтой рентген цацрагаар 49 kV хүчдэл, 15 mA гүйдлийн нөхцөлд хэмжсэн ба хэмжилтийг 5° to 60 °-ийн хооронд 0.02° болон 0.6 s алхмаар гүйцэтгэв. Profex программ ашиглан фазын анализ, хагас тооны анализыг хийв.

Нил улаан гэрлийн спектроскопи. Нунтагласан дээжийг ФТХ-ийн Аналитик лабораторид IR Prestige 21 маркийн спектрометрийн багаж ашиглан нил улаан гэрлийн спектрыг 400-4000 см⁻¹ долгионы мужид авав. Дээжийг KBr-той ойролцоогоор 1:100 харьцаагаар сорьцолж, гар прессээр (~10 МПа) дарж шахмал хэлбэртэй бэлтгэн вольфраман гэрлийн эх үүсвэр ашиглаж хэмжилтийг хийв. Нил улаан гэрлийн спектрометрийн хэмжилтийг спектрыг тайлахдаа (De Benedetto, 2002; Shoval et al., 2011; Toffolo et al., 2019) ашиглав.

Раман спектроскопи. Раман спектрометрийн хэмжилтийг NSR-5600, JASCO Int. багажаар 100-1200 см⁻¹ долгионы мужид ШУТИС-д гүйцэтгэв.

Хүснэгт 1. Дээжийн мэдээлэл, зураг

Дээжийн тайлбар	Гэрэл зураг	Дээжийн тайлбар	Гэрэл зураг
Kh25-1 Түүхий шавар, цайвар бор өнгөтэй, Тойрмын нуур		Kh25-2 Түүхий шавар, саарал өнгөтэй, ургамлын үлдэгдэлтэй, Дүнгэнэдэг нуур	
Kh25-3 Сүм 1, дэлдсэн суурь, Бор өнгөтэй, шавар, хөрс болон зотон хольц		Kh25-4 Сүм 2, дэлдсэн суурь, Хар бор өнгөтэй, Шавар болон хөрс хольц	
			
Kh25-05 Сүм 1, шалны хавтангийн дээд шавардлага, зузаан 3 см		Kh25-06 Сүм 1, гадна тоосгоны өрлөгийн шавардлага, 1 см зузаан	
Kh25-7 Сүм 1, тоосго, саарал өнгөтэй Тоосгоны хэмжээ: 36 см x 16 см x 5 см		Kh25-11 Сүм 2, тоосго, саарал өнгөтэй	
		Kh25-8 Сүм 2, дээврийн ваар, саарал өнгөтэй	
Kh25-9 Сүм 2, дээврийн ваар, улаан өнгөтэй, ногоон паалантай		Kh25-10 Сүм 1, дээврийн ваар, 5 см зузаан, улаан өнгөтэй, ногоон паалантай	

Раман спектрометрийн хэмжилтэд дээврийн ваарын пааланг хамруулж паалангийн будгийн өнгийг тогтооход (Gunasekaran et al., 2006) ашиглав.

3. Хэмжилтийн үр дүн ба хэлэлцүүлэг

3.1. Түүхийн шавар

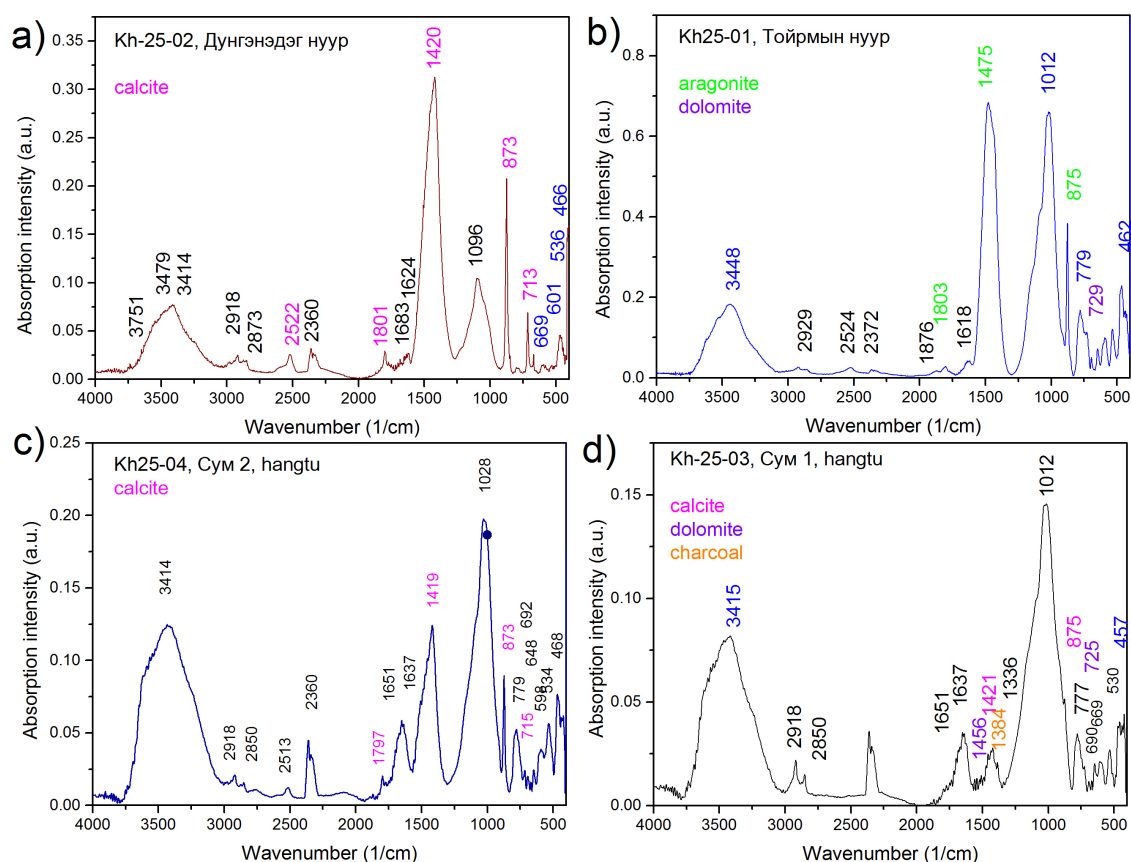
Нил улаан гэрлийн шингээлтийн спектрограммаас Дүнгэнэдэг нуурын шавар Kh25-2 смектит бүлгийн Са-монтморилинит шавар (Зур. 2a) илэрч, шохойн чулууг тодорхойлох үндсэн пик ($\sim 1,420 \text{ cm}^{-1}$ (ν_3), $\sim 875 \text{ cm}^{-1}$ (ν_2), $\sim 712 \text{ cm}^{-1}$ (ν_4) болон нэмэлт пикууд $\sim 2,513 \text{ cm}^{-1}$ ($\nu_1 + \nu_3$), $\sim 1,798 \text{ cm}^{-1}$ ($\nu_1 + \nu_4$), $\sim 1,083 \text{ cm}^{-1}$ (ν_1) байдгаас 2522, 1801, 1420, 873, 713 cm^{-1} пикууд²³ ажиглагдлаа. Тойрмын нуурын Kh25-01 смектит шаварт арагонит CaCO_3 болон доломит $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)$ бүртгэв (Зураг. 2b). Арагонит нь нуурын усанд илэрдэг бол кальцит нь нуураас гадна өргөн хүрээний нөхцөлд үүсдэг, арагонит өндөр температурт кальцит болж хувирдаг онцлогтой. Арагонит кальцитаас бага зэрэг ялгаатай учир дээрх пикууд бага зэрэг шилждэг, $\sim 2,522$ ($\nu_1 + \nu_3$), $\sim 1,788$ ($\nu_1 + \nu_4$), $\sim 1,475$ (ν_3), $\sim 1,083$ (ν_1), ~ 858 (ν_2), $\sim 713 + 700$ (ν_4)

cm^{-1} пикууд (Toffolo et al., 2019) байдгаас Kh25-01-д арагонитд харгалзах 858, 1475 cm^{-1} пикууд, доломитд харгалзах 729 cm^{-1} пик бүртгэв. Доломит нь карбонатын эрдэс учир спектр төстэй хэдий ч кристаллын торонд орсон магнийн ионуудаас болж доломитын ν_4 -ийн пик 728 cm^{-1} руу, ν_2 -ийн пик 881 cm^{-1} руу шилждэг (Toffolo et al., 2019).

Тойрмын нуурын шавар Kh25-01 нь карбонатлаг шавар (calcareous montmorillonite, white clay) бөгөөд тоосго, дээврийн ваар хийхэд нэн тохиромжтой юм. Дүнгэнэдэг нуурын шавар Kh25-01 нь доломит шохойн шавар бөгөөд шохойн шавардлага хийхэд тохиромжтой. Рентген дифракцийн хэмжилт дээрх үр дүнтэй нийцэж байна (Зураг. 3). Рентген дифракцийн хэмжилтийн үр дүнд хийсэн боловсруулалтаар фаз бүрийн агууламжийг жинлэж Хүснэгт 2-т нэгтгэн харуулав.

3.2. Дэлдсэн хөрс

“Сүм 1”, “Сүм 2”-ын суурийг хийхдээ $\sim 10\text{-}15$ см өндөр дэлдсэн хөрс, $\sim 3\text{-}5$ см-ийн зотонгийн үе дараалан хийсэн нэн онцлог байв. Суурийг дэлдэхэд сүрэл, хайрга, хөрс, шавар хольж модон



Зураг 2. Нил улаан гэрлийн спектр

a) Kh25-02 Дүнгэнэдэг нуурын шавар, b) Kh25-01 Тойрмын нуурын шавар, c) Kh25-04 Сүм –ийн дэлдсэн хөрс, d) Kh25-3 Сүм 1-ийн дэлдсэн хөрс

хүрээ дотор нягтруулан үелэн бат бөх хана хийдэг бөгөөд хайрга, хөрс зэргийг энэ удаад цутлуулж амжаагүй болно.

Нил улаан гэрлийн спектрт “Сүм 1”-ийн Kh25-03 болон Тойрмын нуурын шавар Kh25-01 төстэй (Зураг. 2b, d), кальцит болон доломитын үндсэн пикүүд илэрч, харин арагонитын пик илэрсэнгүй. Спектрт 1012 см⁻¹ пик эрчим өндөр байв, 1380 см⁻¹-д нүүрсний үнс, 1636-1637 см⁻¹-д протеины амид (N-H) бүлэг илэрч органик бодис хольсныг харуулж байв.

Эрдсийн фазад боловсруулалт хийж шинжлэхэд шаврын бүрэлдэхүүн болох эрдсүүд бага зэрэг буурч, харин нонтронит өсөж буйг үнс нэмсэнтэй холбоотой гэж үзэв (Хүснэгт 2). Иймд, “Сүм 1”-ын дэлдсэн хөрс Kh25-03-г хийхдээ Тойрмын нуурын шавар, хөрс, органик бодис, үнс хольж хийжээ.

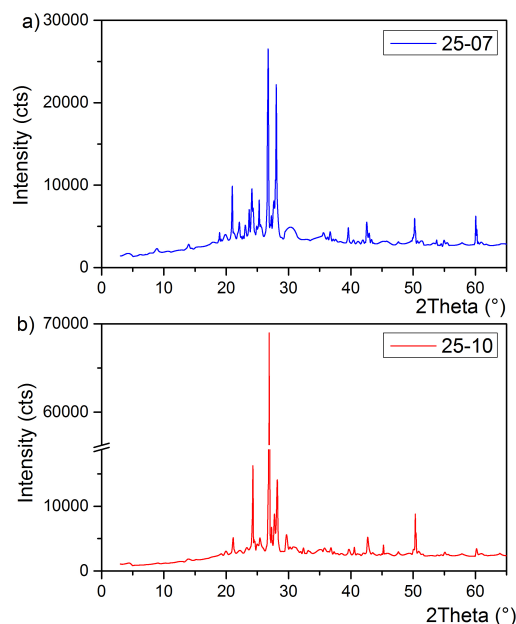
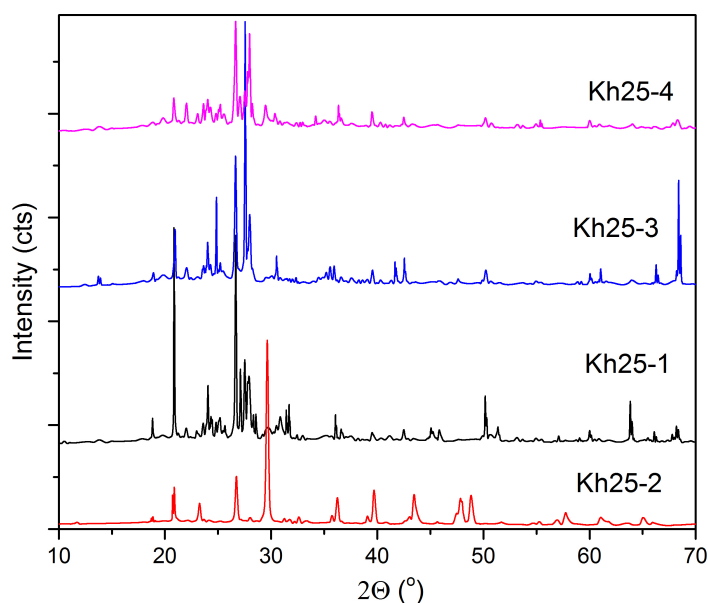
Харин “Сүм 2”-ын Kh25-04 болон Дүнгэнэдэг нуурын шавар Kh25-02 төстэй (Зураг. 2a, c), кальцитын анхдагч пик өндөр эрчимтэй; ν_2/ν_4 -ийн харьцаа ~4.0 буюу геологийн дээж байна. Протеины амид (N-H) бүлэг үүссэн нь органик бодис хольсныг харуулж байна. Хүснэгт 2-т хөрсний бүрэлдэхүүн болох плагиоклас 2.13 wt%-аас 40.27 wt%, мусковит 2.58 wt% -аас 20.01 wt% болж тус тус өссөн нь гаднаас хольцолдсон хөрс, элс байж магадгүй, харин нонтронит 16.37 wt% болж өссөн нь гаднаас үнс хольсонтой холбоотой гэж үзэв. “Сүм 2”-д Дүнгэнэдэг нуурын шаварт хөрс, элс 1:20 харьцаатай хольсон ба органик бодис нэмжээ гэж дүгнэв.

Дэлдсэн хөрсний кварц эсвэл К-жоншийг ялган авч насыг OSL-ийн аргаар (Solongo, Tengis 2015) урьд өмнө тогтоосон учир сүмийн суурь болон хотыг хүрээлж буй чулуун хэрэм хананы дотор талын гол хэсэг нь шатаасан тоосгоор хучигдсан шороон давхаргын насыг люминесценцийн аргаар тогтоох боломжтой.

Хүснэгт 2. XRD хэмжилтийн үр дүнд хийсэн хагас тоон шинжилгээ:

+++ элбэг; ++ дунд; + бага; - илрүүлэх хязгаараас доогуур

Фаз / Дээж	K25-02	K25-01	K25-03	K25-04	K25-07	K25-10
Кварц	++	+++	++	++	+++	+++
Микроклин	-	+++	++	+	-	-
Плагиоклас	+	+++	++	+++	-	-
Анортит	-	-	-	-	+++	++
Кальцит	+++	+	-	+	-	-
Mg-кальцит	+++	-	-	-	-	-
Арагонит	-	+	-	-	-	-
Доломит	-	++	-	-	-	-
Смектит	-	+	+	+	-	+
Мусковит	+	-	+	-	-	-
Nontronite	-	-	+++	++	-	-
Санидин	-	-	-	-	-	+
Энстатит	-	-	-	-	+	+
Волластонит	-	-	-	-	+	-
Гематит	-	-	-	-	-	+



Зураг 3. Рентген дифракцын хэмжилтийн дүн

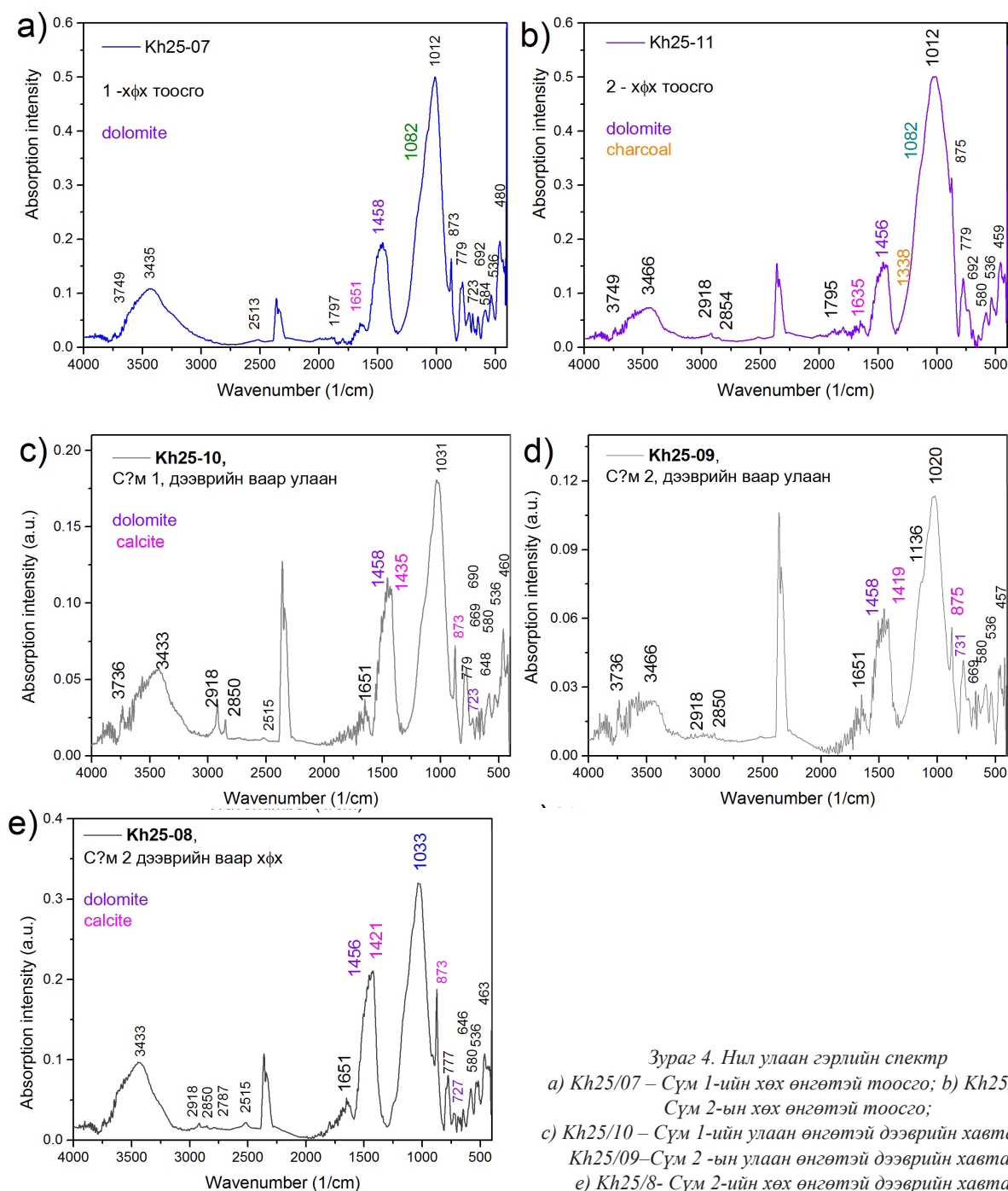
Зүүн талд: түүхий шавар Kh25-02, Kh25-01, дэлдсэн хөрс Kh25-04, Kh25-03, Баруун талд: тоосго Kh25-07, дээврийн хавтан Kh25-10.

3.3. Шатаасан тоосго, дээврийн хавтан

Хархул хааны балгас дахь барилгын материалыг “мантуу” зууханд үйлдвэрлэж эртний архитектурын барилгын тоосго, дээврийн хавтанг үйлдвэрлэсэн болно (Н.Эрдэнэ-Очир нар, 2024). “Мантуу” зуух нь нүүрс ашигладаг учир шатаах температур 800-1000°C –ын хооронд боловч 1370 °C-д хүрэх хүчин чадалтай, ангижруулах болон исэлдүүлэх орчин үүсгэх боломжтой (Kerr and Wood 2004).

Ми Ингцао Фаши - miYingzao Fashi (Guo

2000) хэмээх 1103 онд хэвлүүлсэн Сүн улсын архитектурын барилгын талаарх техникийн гарын авлагын дагуу тоосго үйлдвэрлэхэд элсэрхэг шавар хольдог, харин дээврийн хавтанд зөвхөн нарийн ширхэгтэй шавар ашиглаж шаврыг устай хольж байлгаад хэвд оруулж шатаадаг бөгөөд “эхний өдөр зууханд тоосго, хавтан овоолж, 2 дахь өдөр галлаж, 3 дахь өдөр зуухыг онгойлгож хөргөж, 7 дахь өдөр буулган, харин паалантай тоосго хавтанг 5 дахь өдөр буулгах горимтой” гэжээ. Түүнчлэн “Yin shui”-д заасны дагуу шатаалтын



Зураг 4. Нил улаан гэрлийн спектр

- a) Kh25/07 – Сүм 1-ийн хөх өнгөтэй тоосго; b) Kh25/11 – Сүм 2-ын хөх өнгөтэй тоосго;
c) Kh25/10 – Сүм 1-ийн улаан өнгөтэй дээврийн хавтан; d) Kh25/09 – Сүм 2-ын улаан өнгөтэй дээврийн хавтан;
e) Kh25/8- Сүм 2-ийн хөх өнгөтэй дээврийн хавтан

эцэст усны уур зууханд оруулж хөргөлтийн хурдыг өсгөхөд H_2 , CO бүхий ангижруулах орчин бий болж, төмрийн исэл FeO , Fe_3O_4 үүсэж тоосго, дээврийн хавтанг хөх саарал өнгөтэй (Cultrone 2004) болгодог. Хөргөх зорилгоор гаднаас ус хийхгүй аваас Fe^{3+} исэлдүүлэх орчин бүрдэж дээврийн хавтан улаан өнгөтэй болно.

Нил улаан гэрлийн спектрт хоёр өөр сүмийн тоосго Kh-25-07, Kh-25-11 төстэй (Зураг 5a,b); спектрт доломит бүртгэсэн учир Тойрмын нуурын шавраар хийсэн тоосго гэж үзэв. Спектрт кварц, анортитд харгалзах пикуд 935, 1004, 1085, 1140 cm^{-1} өндөр эрчимтэй пиктэй давхцаж ялгахад бэрхшээлтэй байв. Түүнчлэн хоёр өөр сүмийн дээврийн хавтан Kh-25-10, Kh-25-09 (Зураг 5c,d) болон Kh-25-08 (Зураг 5c,d) -ийн спектр төстэй; доломит болон кальцит бүртгэгдсэн учир Тойрмын нуурын шавраар хийжээ. Спектрт санидин 1010, 1028, 1133 cm^{-1} илэрч байна.

Харин рентген дифракцийн хэмжилтээр Kh-25-07-д (Зураг 3e, Хүснэгт 2) анортит, кварц, энстатит, волластонит бүртгэж, Kh-25-010-д (Зураг 6b) анортит, кварц, энстатит, санидин, гематит (Fe_2O_3) илрүүлж байна. Эдгээр эрдсийн фазад тулгуурлан шатаалтын температурыг шинжлэв.

Кальцит 675 - 800°C-т задарч шинэ эрдэс үүсдэг, доломит ~800°C-д задарч (Gliozzo 2020), харин керамик материал шатааж дууссаны дараа шохой, уур, нүүрс хүчлийн давхар исэл (CO_2)-тэй урвалд орж “reformed calcite” пик бүртгэгддэг (Shoval et al., 2011) бөгөөд 900°C-д бага хэмжээний кальцит ба доломит (Cultrone et al. 2004) бүртгэгддэг; 1000°C-аас дээш температурт кварц нь эргэн тойрны фазын найрлагаас хамааран анортит геленит, волластонит зэрэг шинэ үе шат үүсэхэд оролцдог ба 1100°C-д волластонит үүсдэг. Иймд, тоосгонд волластонит, анортит илэрсэн учир шатаалтын температур 950-1100°C-ийн хооронд гэж үзэв.

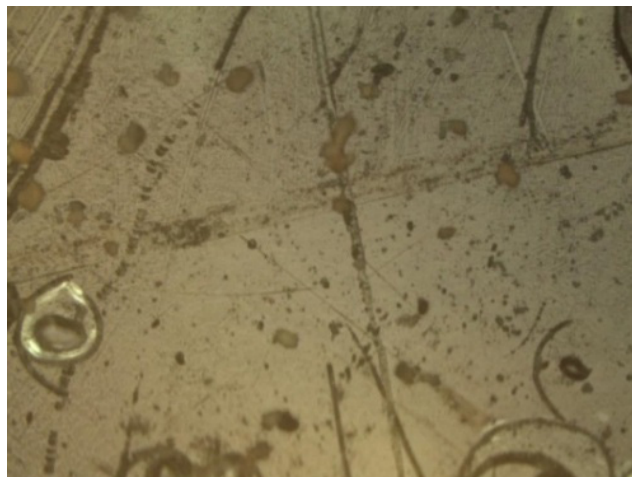
Kh25-07, Kh25-11 дээжид шатаалтын температур тодорхойлох зорилгоор нил улаан гэрлийн спектрыг шинжлэв. Энд SiO_2 -ийн пик 1082 cm^{-1} руу шилжсэн нь 900°C болон түүнээс их температурт шатаасан болохыг илтгэдэг учир тоосгыг 900°C –ээс их температурт шатаажээ. Тоосгыг шатаах температур нь түүний физик шинж чанарыг тодорхойлдог; хоёр өөр сүмээс авсан тоосгоны спектрт тулгуурлан ижил технологиор үйлдвэрлэжээ гэж дүгнэв. Тоосгыг тосонд дэвтээсэн эсэхийг шалгахад хатаасан тосны пик үгүй байв. Харин “Сүм 2”-ийн Kh25-11-д кальцийн оксалат-д харгалзах 1635, 1338 cm^{-1} пикийг бүртгэв.

Дээврийн хавтан Kh-25-010-д гематит Fe_2O_3 бага хэмжээтэй илэрч, гематит нь 850°C үүсдэг, энстатит нь 895°C-д үүсдэг, нөгөөтээгүүр, 950°C-т смектитын дегидроксилаци явагдаж, анортит, санидин үүссэн байж болно. Иймд дээврийн хавтангийн шатаалтын температур 850 -900°C - д байжээ.

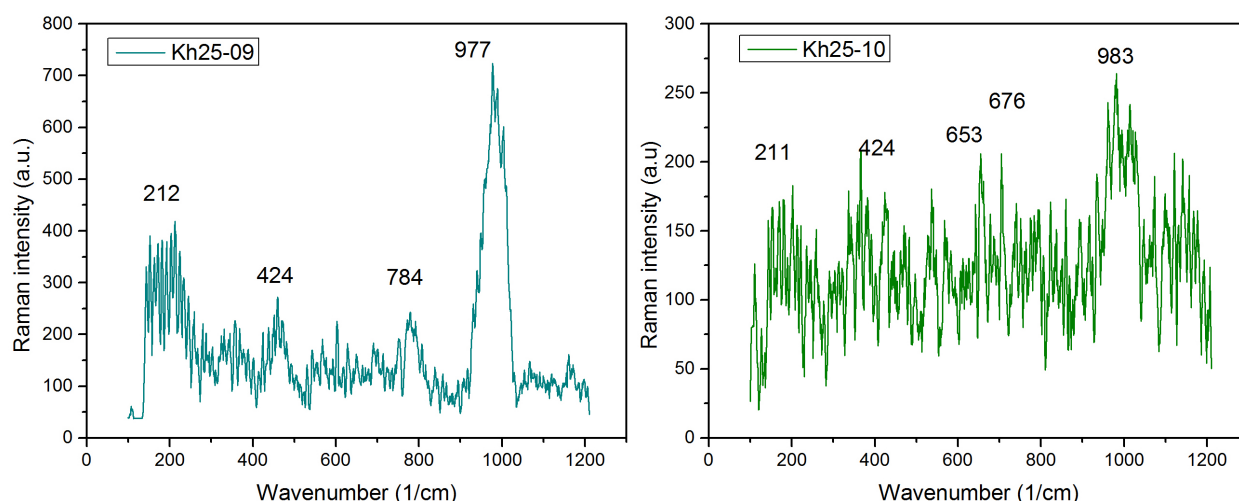
Kh25-08, Kh25-9, Kh25-10 дээжид шатаалтын температур тодорхойлох SiO_2 -ийн пик 1020 - 1030 cm^{-1} -ийн хооронд буй нь 700-800°C-д шатаасныг илтгэнэ (Shoval et al., 2011). Шатаалтын эцсийн шатанд “Yin shui”-д зааснаар усны уур үүсгэж ангижруулах орчинд дээврийн хавтан хөх саарал өнгөтэй, эсрэгээр усны уур үгүй бол исэлдүүлэх орчинд дээврийн ваар улаан өнгөтэй болно. Улаан өнгөтэй дээврийн хавтанд гематит илэрсэн нь исэлдүүлэх орчин үүсгэх технологийн алхамтай нийцэж байна. Харьцуулахад, рентген дифракцийн хэмжилтээр гематит илэрсэн бөгөөд гематит 850°C-аас их болоход үүсдэг билээ.

3.4. Дээврийн хавтангийн ногоон паалан

Сүм хийдийг ногоон, цэнхэр бүрхүүлтэй керамик хавтангаар бүрдэг байжээ (Steinhardt 1990). Ногоон өнгийн будаг хийхэд хромын



Зураг 5. Ногоон паалангийн микро бүтэц. Зүүн талд- Kh25-9; баруун талд- Kh25-10.



Зураг 6. Kh25-9, Kh25-10 дээжийн раман спектр

исэл (Cr_2O_3), малахит ($\text{CuCO}_3\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2$), шороон ногоон будаг ($\text{K}(\text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+})(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+})$), атакамит (atacamite, $\text{CuCl}_2\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2$) (Gunasekaran, 2006) ашигладаг. Дээврийн хавтангийн гадаргуу дээр өнгөтэй будгаар будаж хатаагаад усны нэвчилтээс хамгаалах зорилготой PbO , SiO_2 бүхий өнгөгүй паалангийн нимгэн үеийг түрхэж ахин шатаадаг технологитой.

“Сүм 1”, “Сүм 2”-ын дээврийн ваарын паалангийн микро бүтэц (Зураг. 5), паалангийн будагт хийсэн раман спектроскопын хэмжилтийн үр дүнг (Зураг. 6) үзүүлэв.

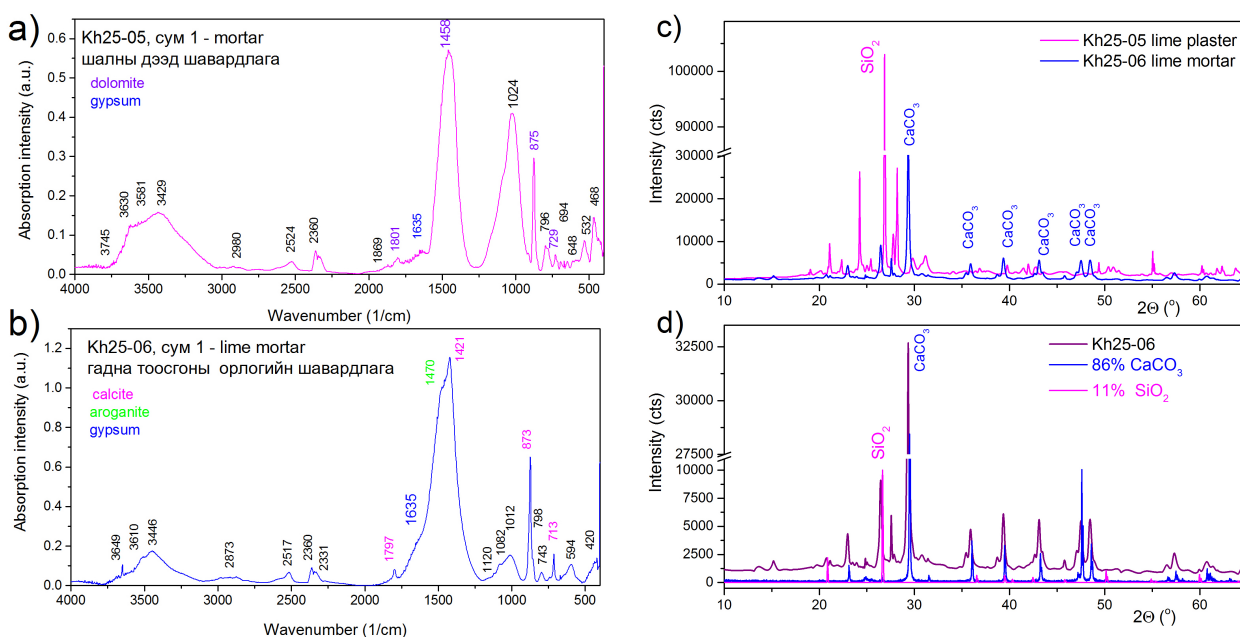
Kh25-9 дээжид 219, 341, 424, 511, 834, 977 cm^{-1} пикууд, Kh25-10 дээжид 211, 341, 424, 511, 834, 983 cm^{-1} пикууд бүртгэж атакамит (atacamite, $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) болохыг харуулж байна. Пикийн ялгаа нь дээврийн ваарын шатаалтын температур 750-850°C-ийн хооронд буйтай холбоотой гэж үзэв.

3.5. Шохойн зуурмаг, шавардлага

Шохойн зуурмаг болон шавардлага нь эртний пиротехнологийн материалуудын нэг бөгөөд холбогч, дүүргэгч болон органик (органик бус) нэмэлтүүдээс бүрддэг нийлмэл материал юм. Эрт дээр үеэс чулуу, тоосгоны суурь зуурмаг, хананы тоосгоны шавардлага, өрлөгийн дүүргэгч материал гэх мэт янз бүрийн зорилгоор ашиглаж ирсэн байдаг (Calandra et al. 2026). Ингэхдээ шохойн чулууг шатаах замаар үүсэн лакшин (CaO)-г унтрааж үүссэн $\text{Ca}(\text{OH})_2$ нь агаарт байгаа CO_2 -той урвалд орж, антропоген кальцит гэж нэрлэгдэх чулуу шиг бат бөх шавардлага үүсдэг. Гидравлик зуурмаг буюу “*pozzolan* Roman cement” гэдэг зуурмагийг агаарт бус өндөр чийгшилтэй нөхцөлд эсвэл усанд хатууруулдаг. Мөн галт уулын үнс, буталсан керамик нэмж агаарт хатууруулах замаар гаргаж авдаг. Харин ус нэвтэрдэггүй болгох зорилгоор органик бодис нэмдэг технологи Азид

өргөн дэлгэрч зуурмагийг Сүн гүрний барилгын гол өрлөг, бунхан, Юань, Минь Улсын үед барилгын төрөл бүрийн бүтцэд хэрэглэж, шохойн зуурмагт наалдамхай будаа, бор сахар, өндөгний цагаан, амьтны цус, тос зэрэг органик нэмэлт хэрэглэдэг байжээ (Zhang, Sui et al. 2021). “Tabia” хэмээх зуурмаг хийх нэгэн жорын дагуу “шохойн 1 хэсэг, шавар, элсний 2 хэсэг, наалдамхай будаа эсвэл усан үзмийн шүүсээр зуурна” гэж тэмдэглэжээ. Элсний оронд тоосго, хавтангийн тоос (tile dust) хэрэглэдэг гэжээ.

Бид “сүм 1” барилгын шалны хатангийн дээд шавардлага (Kh25-05), тоосгоны хоорондын зуурмаг (Kh25-06) гэсэн хоёр өөр шавардлагыг харьцуулан судлав. Kh25-05-ийн нил улаан гэрлийн спектрт (Зураг 4a) доломит илэрч, карбонатын бүлэгт хамаарах (874, 1795 cm^{-1}) давтамжийн утга бүртгэгдсэн хэдий ч кальцитын анхдагч пик илрээгүй бөгөөд ν_2/ν_4 -ийн харьцаа ~ 7.0 болж шатаасан горимыг илтгэж байв. Элсний бүрэлдэхүүн хэсэг кварц, түүнчлэн өндөр температурт үүсдэг SiO_2 -ийн полиморф (1166, 1869 cm^{-1})-ийн пик бүртгэгдсэн нь “tile dust” буюу өндөр температурт шатаасан тоосгоны нарийн ширхэгтэй үнс бололтой. Зуурмагт органик хольц хольсон эсэхийг шалгахад, спектрт органик бодисын C-O-ийн холбоост (Zhang 2021) харгалздаг пик $\sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ өндөр эрчимтэй 1024 cm^{-1} -тэй давхцаж байв. Харин 1635-1637 cm^{-1} -д протеины амид (N-H) бүлэг үүссэн нь наалдамхай будаанаас өөр органик бодис хольсныг харуулав. Орчны хөрсийг цуглуулж ахин нягтлах шаардлагатай хэдий ч “lime plaster” хийх технологийн дагуу шалны дээд шавардлага Kh25-05-д доломит шохой, элс болон “tile dust” найруулж үнс:элс:шохой 2:2:4 гэсэн харьцаа бүхий шавардлагад органик бодис нэмж хийжээ.



Зураг 7. Нил улаан гэрлийн спектр
а) Kh25-05. б) Kh25-06. Рентген дифракцийн хэмжилт в) Kh25-05 болон Kh25-06 г) Kh25-06

Хүснэгт 3. Хагас тоон шинжилгээний үр дүн

Дээж	ангилал	Фаз	Wt.%	Wt.%
K25-5	Шавар	ортоклас	+	25
		кварц	+	
		мусковит	+	
	"Tile dust"	энстатит	++	20
		нонтронит	+	
		воластонит	+	
K25-6	Шохой	ватерит	+	40
		Доломит	+	
		дикит	+++	
	Шохой	Кальцит	+++	86
		Арагонит	+	
		Диопсид	+	
K25-6	Элс хөрс	Кварц	+	10

Kh25-6-ийн нил улаан гэрлийн спектрт (Зураг. 4b), кальцит болон арагонитын пик илт давамгайлж, элсний бүрэлдэхүүн хэсэг болох кварц маш бага эрчимтэй, харин 1635-1637 см⁻¹-д протеины амид (N-H) бүлэг илэрчээ. Түүнчлэн рентген дифракцийн хэмжилтээр (Зураг. 4d) шохой ~86 wt% зонхилж, бага хэмжээний шаварлаг элс хольсныг харуулж байна.

Kh25-5-д доломит илэрч, харин Kh25-6-д кальцит болон арагонит илэрч буйгаас шалны шавардлага хийхэд Тойрмын нуурын шаврыг түүхий эд болгон ашиглаж харин тоосгоны хоорондын зуурмагт Дүнгэнэдэг нуурын шаврыг түүхий эд болгож, шавардлага (*lime plaster*), шохойн зуурмаг (*lime mortar*) гэсэн технологийн хоёр өөр зуурмаг хийснийг харуулж байна.

4. Дүгнэлт

"*Chaîne opératoire*" нь үндсэндээ технологийн үйл ажиллагааг баримтжуулах хэрэгсэл бөгөөд энэ арга зүйн дагуу материал судлалын олон арга (рентген дифракци, нил улаан гэрлийн спектроскопи, раман спектроскопи) ашиглан, Хархул хааны балгасын "Сүм 1", "Сүм 2" барилгын материалыг судлав.

Тойрмын нуурын карбонатлаг монтмориллонит шавар ("calcareous white clay") ашиглан "мантуу" зууханд эцсийн бүтээгдэхүүн бүхий тоосго, дээврийн ваар үйлдвэрлэжээ. "Сүм 1" болон "Сүм 2"-ийн хөх тоосгыг 950-1100 °C-ийн хооронд ангижруулах орчинд, улаан өнгөтэй дээврийн хавтанг ~850°C-д исэлдүүлэх орчинд эртний Сүн улсын үеийн технологийн дагуу үйлдвэрлэжээ хэмээн үзэж байна. Дээврийн паалангийн будаг атакамит болохыг тогтоосон хэдий ч найрлагад ямар технологи ашигласныг цаашид тогтоох шаардлагатай юм. Шалны шавардлага нь шохой, элс, үнс, органик бодис гэсэн нийлмэл найрлагатай ба Тойрмын нуурын шаврыг түүхий эд болгон ашигласан бол тоосгоны хоорондын зуурмагт Дүнгэнэдэг нуурын шаврыг түүхий эд болгон, шавардлага (*lime plaster*), шохойн зуурмаг (*lime mortar*) гэх мэтээр технологийг төрөлжүүлсэн онцлог ажиглагдаж байна.

Хархул хааны балгасын он цагийг (Эрдэнэ-Очир, Мөнхбаяр et al. 2024) баталгаажуулахаар дэлдсэн хөрс, шороон давхаргын насыг люминесценцийн хэмжилтэд авч шохойн зуурмагийн насыг ч зарчмын хувьд ¹⁴C-ээр тогтоох боломжтой гэж үзэв.

Археологи болон археометрийн салбар дундын судалгаа нь эртний хот сууриныг хэрхэн төлөвлөсөн гол түүхий эд (ус гол, нуурын шавар, хөрс, мод, нүүрс, зотон, малахит, чулуу г.м.), үйлдвэрлэх зуух болон түүнд зориулагдсан технологиос бүтээн байгуулалтын үйл явцыг ойлгож тайлахад шинжлэх ухааны өндөр ач холбогдолтой байна. Тухайлбал, Хархорум хоттой харьцуулах замаар эртний хотын барилгын материал, шашны баримлын технологийн хувьсал хөгжлийг тайлах, сэргээн бүтээх бүрэн боломжтойг тус судалгаа харуулж байна.

НОМ ЗҮЙ

Artioli, G. (2010). "Scientific Methods and Cultural Heritage: An introduction to the application of materials science to archaeometry and conservation science" Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199548262.003.0001>

Audouze, F. (2002). "Leroi-Gourhan, a Philosopher of Technique and Evolution." *Journal of Archaeological Research* 10(4): 277-306. <https://doi.org/10.1023/A:1020599009172>

Calandra, S., Cantisani E., Salvadori B. (2026). "Decoding ancient mortars: complementary strengths of SR-μXRPD and FPA-FTIR in high-resolution binder analysis." *Talanta* 299: 129076. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.129076>

Cultrone, G., Sebastián E., Elert K., Torre M. de la., Cazalla O., Rodriguez Navarro C. (2004). "Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks." *Journal of the European Ceramic Society* 24(3): 547-564. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00249-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00249-8)

De Benedetto, G. E. L., Sabbatini R., Zambonin L., P. G. (2002). "Infrared spectroscopy in the mineralogical characterization of ancient pottery." *Journal of Cultural Heritage* 3(3): 177-186. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01178-0](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01178-0)

Gliozzo, E. (2020). "Ceramic technology. How to reconstruct the firing process" *Archaeological and Anthropological Sciences* 12 (11): 260. <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01133-y>

Gunasekaran, S., Anbalagan G., Pandi S. (2006). "Raman and infrared spectra of carbonates of calcite structure." *Journal of Raman Spectroscopy: An International Journal for Original Work in all Aspects of Raman Spectroscopy, Including Higher Order Processes, and also Brillouin and Rayleigh Scattering* 37(9): 892-899. <https://doi.org/10.1002/jrs.1518>

Guo, Q. (2000). "Tile and Brick Making in China: a Study of the Yingzao Fashi. 4." *Construction History* 16: 3-11.

Hüttel, H. G. and Erdenebat U. (2011). "Karabalgasun and Karakorum. Two late nomadic urban settlements in the Orkhon Valley", *Ulaanbaatar*.

Kerr, R. and Wood N. (2004). "Science and Civilization in China", Cambridge University Press.

Ma X., W. G., Grifa C., Kang Y., Khanjian H., Kakoulli I. (2018). "Multi-analytical Studies of Archaeological Chinese Earthen Plasters: The Inner Wall of the Longhu Hall (Yuzhen Palace, Ancient Building Complex, Wudang Mountains, China)." *Archaeometry* 60(1): 1-18. <https://doi.org/10.1111/arc.12318>

Regev, D., E. Boaretto and I. Gronau (2025). "Discrepancies between radiocarbon dates and dated finds among Phoenician tombs in Sicily." *Radiocarbon* 67(3): 630-645. <https://doi.org/10.1017/RDC.2025.17>

Reichert, S., Erdene-Ochir N., Linzen S., Munkhbayar L. and Bemmann J. (2022). "Overlooked—Enigmatic—Underrated: The City Khar Khul Khaany Balgas in the Heartland of the Mongol World Empire." *Journal of Field Archaeology* 47(6): 397-420. <https://doi.org/10.1080/00934690.2022.2085916>

Ricci, G., Caneve L., Pedron D., Holesch N. and Zendri E. (2016). "A multi-spectroscopic study for the characterization and definition of production techniques of German ceramic sherds." *Microchemical Journal* 126: 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.12.009>

Saran S., Otgonsuren D. "Study of ceramic building materials from Choijin Lam temple museum using spectroscopic and termogravimetric methods. Физик, технологийн хүрээлэнгийн бүтээл 47(2020): 75-91.

Scifo, A., Abi Nassif T., Conti M., Bayliss A., Doeve P. and Dee M. W. (2024). "New data fails to replicate the small-scale radiocarbon anomalies in the early second millennium CE" *Radiocarbon* 66(3): 518-531. <https://doi.org/10.1017/RDC.2024.52>

Shatzman Steinhardt, N. (1990). *Chinese Imperial City Planning*, Honolulu: University of Hawai'i Press. <https://doi.org/10.1515/9780824841478>

Shi, R., Wen R., Ma Q. and Wang W. (2025). "Technological integration and innovation in architectural ceramics in the Yuan Dynasty: chemical investigation for the glazed tiles of the Prince Anxi's mansion, China." *npj Heritage Science* 13(1): 101. <https://doi.org/10.1038/s40494-025-01711-0>

Shoval, S. and P. Beck (2005). "Thermo-FTIR spectroscopy analysis as a method of characterizing ancient ceramic technology" *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 82(3): 609-616. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-0941-x>

Shoval, S., E. Yadin and G. Panczer (2011). "Analysis of thermal phases in calcareous Iron Age pottery using FT-IR and Raman spectroscopy." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 104(2): 515-525. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1518-5>

Solongo, S., Franken C., Tengis S., Ulambayar E.

and Batbayar T. (2020). “Multi-method (XRF, FTIR, TGA) analysis of ancient bricks from Karabalgasun: A preliminary study” *Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences* 60 (1): 1-8. <https://doi.org/10.5564/pmas.v60i1.1331>

Solongo, S. and Tengis S. (2015). “The feldspar pIRIR and quartz OSL on silty-clay sediments from walled ramparts in Orkhon Valley, Mongolia” *Quaternary Geochronology* 30: 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2015.06.013>

Solongo, S., Tengis S., Enkhbat G., Orgil B. and Erdenebold L. (2023). “Multimethod characterization of terracotta figurines and lime mortar from the elite burials Shoroon Bumbagar I and II, Mongolia” *Archaeometry* 65 (1): 49-63. <https://doi.org/10.1111/arc.12799>

Solongo, S., Wagner G. A. and Galbaatar T. (2006). “The estimation of *De* using the fast and medium components in fired quartz from archaeological site Karakorum, Mongolia” *Radiation Measurements* 41(7-8): 1001-1008. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.05.023>

Solongo S., Tengis S., Wagner G.A.T. and H. H-G. (2020). “CW-OSL, LM-OSL and TL dating of bricks from Karakorum, Mongolia: Insights from TL spectra” *Geochronometria*. <https://doi.org/10.2478/geochr-2020-0003>

Tite, M. S. (2008). “Ceramic production, provenance and use—a review*.” *Archaeometry* 50(2): 216-231. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00391.x>

Toffolo, M. B., Regev L., Dubernet S., Lefrais Y. and Boaretto E. (2019). “FTIR-Based Crystallinity Assessment of Aragonite–Calcite Mixtures in Archaeological Lime Binders Altered by Diagenesis” *Minerals* 9(2): 121.

Xu, L., Ma X., Zhang B., Zhang Q. and Zhao P. (2019). “Multi-analytical Studies of the Lime Mortars from the Yanxi Hall in the Yangxin Palace of the Palace Museum (Beijing)” *Archaeometry* 61(2): 309-326. <https://doi.org/10.1111/arc.12421>

Zhang, K., Sui Y., Wang L., Tie F., Yang F., Liu Y. and Zhang Y. (2021). “Effects of sticky rice addition on the properties of lime-tile dust mortars” *Heritage Science* 9(1): 4. <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00475-z>

Эрдэнэ-Очир Н., Мөнхбаяр Л., Оюунбилэг З., Дуламсүрэн Ц., Амгалан Н., Цэнгүүн Г., Лхагвасүрэн Б., Ууганбаяр М., Нандинцэцэг Н. (2024). “Хархул Хааны Балгас эртний хотын Буддын сүмийн судалгаа”, Монголын Археологийн Мэдээ, 138-141.

Эрдэнэ-Очир Н., Анхбаяр Б., Батболд Г., Цэнгүүн Г., Лхагвасүрэн Б., Түвшин Э., Нандинцэцэг Н., Март Б., Ганбаатар Л., Нямхүү М. “Хархул хааны балгасын археологийн судалгааны үр дүн (2022-2023)” // *Studia Archaeologica*, Tomus

XLIV, Fasc. 16. Улаанбаатар, 2024. Тал 192-209. <https://doi.org/10.5564/sa.v44i1.3530>

REFERENCE

Artioli, G. (2010). “Scientific Methods and Cultural Heritage: An introduction to the application of materials science to archaeometry and conservation science” Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199548262.003.0001>

Audouze, F. (2002). “Leroi-Gourhan, a Philosopher of Technique and Evolution” *Journal of Archaeological Research* 10(4): 277-306. <https://doi.org/10.1023/A:1020599009172>

Calandra, S., E. Cantisani and B. Salvadori (2026). “Decoding ancient mortars: complementary strengths of SR-μXRPD and FPA-FTIR in high-resolution binder analysis” *Talanta* 299: 129076. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.129076>

Cultrone, G., E. Sebastián, K. Elert, M. de la Torre, O. Cazalla and C. Rodríguez-Navarro (2004). “Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks” *Journal of the European Ceramic Society* 24(3): 547-564. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00249-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00249-8)

De Benedetto, G. E. L., R. Sabbatini, L. Zambonin, P. G. (2002). “Infrared spectroscopy in the mineralogical characterization of ancient pottery” *Journal of Cultural Heritage* 3(3): 177-186. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01178-0](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01178-0)

Giozzo, E. (2020). “Ceramic technology. How to reconstruct the firing process” *Archaeological and Anthropological Sciences* 12(11): 260. <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01133-y>

Gunasekaran, S., G. Anbalagan and S. Pandi (2006). “Raman and infrared spectra of carbonates of calcite structure” *Journal of Raman Spectroscopy: An International Journal for Original Work in all Aspects of Raman Spectroscopy, Including Higher Order Processes, and also Brillouin and Rayleigh Scattering* 37(9): 892-899. <https://doi.org/10.1002/jrs.1518>

Guo, Q. (2000). “Tile and Brick Making in China: a Study of the Yingzao Fashi. 4.” *Construction History* 16: 3-11.

Hüttel, H. G. and U. Erdenebat (2011). “Karabalgasun and Karakorum. Two late nomadic urban settlements in the Orkhon Valley” Ulaanbaatar.

Kerr, R. and N. Wood (2004). *Science and Civilization in China.*, Cambridge University Press.

Ma X., W. G., Grifa C., Kang Y., Khanjian H., Kakoulli I. (2018). “Multi-analytical Studies of Archaeological Chinese Earthen Plasters: The Inner Wall of the Longhu Hall (Yuzhen Palace, Ancient Building Complex, Wudang Mountains, China)” *Archaeometry* 60(1): 1-18. <https://doi.org/10.1111/arc.12318>

Regev, D., E. Boaretto and I. Gronau (2025). “Discrepancies between radiocarbon dates and

dated finds among Phoenician tombs in Sicily.” *Radiocarbon* 67(3): 630-645. <https://doi.org/10.1017/RDC.2025.17>

Reichert, S., N.-O. Erdene-Ochir, S. Linzen, L. Munkhbayer and J. Bemmman (2022). “Overlooked Enigmatic—Underrated: The City Khar Khul Khaany Balgas in the Heartland of the Mongol World Empire” *Journal of Field Archaeology* 47(6): 397-420. <https://doi.org/10.1080/00934690.2022.2085916>

Ricci, G., L. Caneve, D. Pedron, N. Holesch and E. Zendri (2016). “A multi-spectroscopic study for the characterization and definition of production techniques of German ceramic sherds” *Microchemical Journal* 126: 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.12.009>

S.Saran, D.Otgonsuren. “Study of ceramic building materials from Choijin Lam temple museum using spectroscopic and termogravimetric methods. *Fizik tyekhnologiin khureelengiin buteel* 47 (2020): 75-91.

Scifo, A., T. Abi Nassif, M. Conti, A. Bayliss, P. Doeve and M. W. Dee (2024). “New data fails to replicate the small-scale radiocarbon anomalies in the early second millennium CE.” *Radiocarbon* 66(3): 518-531. <https://doi.org/10.1017/RDC.2024.52>

Shatzman Steinhart, N. (1990). *Chinese Imperial City Planning*, Honolulu: University of Hawai'i Press. <https://doi.org/10.1515/9780824841478>

Shi, R., R. Wen, Q. Ma and W. Wang (2025). “Technological integration and innovation in architectural ceramics in the Yuan Dynasty: chemical investigation for the glazed tiles of the Prince Anxi's mansion, China” *npj Heritage Science* 13 (1): 101. <https://doi.org/10.1038/s40494-025-01711-0>

Shoval, S. and P. Beck (2005). “Thermo-FTIR spectroscopy analysis as a method of characterizing ancient ceramic technology” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 82 (3): 609-616. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-0941-x>

Shoval, S., E. Yadin and G. Panczer (2011). “Analysis of thermal phases in calcareous Iron Age pottery using FT-IR and Raman spectroscopy” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 104(2): 515-525. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1518-5>

Solongo, S., C. Franken, S. Tengis, E. Ulambayar and Batbayar T. (2020). “Multi-method (XRF, FTIR, TGA) analysis of ancient bricks from Karabalgasun: A preliminary study” *Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences* 60 (1): 1-8. <https://doi.org/10.5564/pmas.v60i1.1331>

Solongo, S. and S. Tengis (2015). “The feldspar pIRIR and quartz OSL on silty-clay sediments from walled ramparts in Orkhon Valley, Mongolia” *Quaternary Geochronology* 30: 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2015.06.013>

Solongo, S., S. Tengis, G. Enkhbat, B. Orgil and L. Erdenebold (2023). “Multimethod characterization of terracotta figurines and lime mortar from the elite

burials Shoroon Bumbagar I and II, Mongolia” *Archaeometry* 65 (1): 49-63. <https://doi.org/10.1111/arc.12799>

Solongo, S., G. A. Wagner and T. Galbaatar (2006). “The estimation of *De* using the fast and medium components in fired quartz from archaeological site Karakorum, Mongolia.” *Radiation Measurements* 41 (7-8): 1001-1008. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.05.023>

Solongo S., Tengis S., Wagner G.A.T. and H. H-G. (2020). “CW-OSL, LM-OSL and TL dating of bricks from Karakorum, Mongolia: Insights from TL spectra” *Geochronometria*. <https://doi.org/10.2478/geochr-2020-0003>

Tite, M. S. (2008). “Ceramic production, provenance and use a review*.” *Archaeometry* 50 (2): 216-231. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00391.x>

Toffolo, M. B., L. Regev, S. Dubernet, Y. Lefrais and E. Boaretto (2019). “FTIR-Based Crystallinity Assessment of Aragonite–Calcite Mixtures in Archaeological Lime Binders Altered by Diagenesis” *Minerals* 9 (2): 121.

Xu, L., X. Ma, B. Zhang, Q. Zhang and P. Zhao (2019). “Multi-analytical Studies of the Lime Mortars from the Yanxi Hall in the Yangxin Palace of the Palace Museum (Beijing)” *Archaeometry* 61 (2): 309-326. <https://doi.org/10.1111/arc.12421>

Zhang, K., Y. Sui, L. Wang, F. Tie, F. Yang, Y. Liu and Y. Zhang (2021). “Effects of sticky rice addition on the properties of lime-tile dust mortars” *Heritage Science* 9 (1): 4. <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00475-z>

Erdene-Ochir, N., Munkhbayer L., Oyunbileg Z., Dulamsuren Ts., Amgalan N., Tsenguun G., Lkhagvasuren B., Uuganbayar M., and Nandintsetseg N. 2024. “Kharkhul Khaany Balgas ernii khotyn Buddyn sūmiiin sudalgaa” *Mongolyn Arkheologiin Medee* 2024: 138–141.

Erdene-Ochir, N., B. Ankhbayar, G. Batbold, G. Tsenguun, B. Lkhagvasuren, E. Tuvshin, N. Nandintsetseg, B. Mart, L. Ganbaatar, and M. Nyamkhuu. 2024. “Kharkhul khaany balgasiin arkheologiin sudalgaany ür dun (2022–2023)” *Studia Archaeologica* 44 (fasc. 16): 192–209. <https://doi.org/10.5564/sa.v44il.3530>



Open Access This is an open access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited, appropriate credit is given, any changes made indicated, and the use is non-commercial.

See: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>