



МОНГОЛ УЛСЫН ИХ СУРГУУЛЬ  
ШИНЖЛЭХ УХААНЫ СУРГУУЛЬ  
ГАЗАРЗҮЙН ТЭНХИМ

Газарзүйн асуудлууд

---

*Geographical Issues*

*Volume 24 (2)*

*ISSN: 2312-8534*

*2024*

*Улаанбаатар хот*

**Цэвдэгт бүс нутгийн хөрсний органик нүүрстөрөгчийн агууламжийн орон  
зайн тархалтын зураглал: Баянзүрх сумын жишээн дээр**  
**Spatial distribution mapping of soil organic carbon content in permafrost region:  
case study in Bayanzurkh soum, North Mongolia**

©Ариунболд Маралмаа<sup>1,2\*</sup>, Адьяа Саруулзаяа<sup>1</sup>, Ёндонрэнцэн Пүрэвдулам<sup>1,3</sup>, Батболд  
Батзориг<sup>1,2</sup>, Ганхуяг Нэмэхбаяр<sup>4</sup>

Ariunbold Maralmaa<sup>1,2\*</sup>, Adiya Saruulzaya<sup>1</sup>, Yondonrentsen Purevdulam<sup>1,3</sup>, Batbold  
Batzorig<sup>1,2</sup>, Gankhuyag Nemekhbayar<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Цэвдэг судлалын салбар, Газарзүй, геоэкологийн хүрээлэн, Монгол Улсын Шинжлэх Ухааны  
Академи, Монгол Улс

<sup>2</sup>Газарзүйн тэнхим, Шинжлэх Ухааны Сургууль, Монгол Улсын Их Сургууль, Монгол Улс

<sup>3</sup>Биологийн тэнхим, Шинжлэх Ухааны Сургууль, Монгол Улсын Их Сургууль, Монгол Улс

<sup>4</sup>Хүрээлэн буй орчин, ойн инженерчлэлийн тэнхим, Инженер Технологийн Сургууль, Монгол  
Улсын Их Сургууль, Монгол Улс

<sup>1</sup>Division of Permafrost Research, Institute of Geography and Geoecology, Mongolian Academy of  
Sciences, Mongolia

<sup>2</sup>Department of Geography, School of Arts and Sciences, National University of Mongolia, Mongolia

<sup>3</sup>Department of Biology, School of Arts and Sciences, National University of Mongolia, Mongolia

<sup>4</sup>Department of Environment and Forest Engineering, School of Engineering and Technology, National  
University of Mongolia, Mongolia

\*Харилцагч зохиогч: [maralmaa\\_a@mas.ac.mn](mailto:maralmaa_a@mas.ac.mn)

\*Corresponding author: [maralmaa\\_a@mas.ac.mn](mailto:maralmaa_a@mas.ac.mn)

Хүлээн авсан: 2024.08.14

Засварласан: 2024.10.17

Зөвшөөрөгдсөн: 2024.11.03

### Хураангуй

Хөрсний органик нүүрстөрөгч (ХОН) нь шим тэжээлийн элементийн гол цөм, хөрсний үржил шимийн үндсэн хэсэг бөгөөд дэлхийн нүүрстөрөгчийн эргэлтэд шууд нөлөөлдөг. Цэвдэгт бүс нутагт нь хөрсний температур бага, усны шилжилт хөдөлгөөний дутмаг байдлаас шалтгаалан органик нүүрстөрөгч бүрэлдэх таатай нөхцөл бий болдог. Дэлхийн цэвдэгт бүсэд агуулагдаж буй хөрсний органик нүүрстөрөгчийн нөөц нь ойн хөрсөнд агуулагдаж буй нөөцөөс гурав дахин их байдаг. Хөрсний органик нүүрстөрөгчийн агууламжийн орон зайн тархалтыг зурагласнаар нүүрстөрөгчийн нөөцийг тооцож, цаашидад цэвдэгт бүс нутгийн нүүрстөрөгчийн эргэлт, тэдгээрийн тооцоо судалгаанд чухал ач холбогдолтой мэдээлэл болно. Бид энэхүү судалгаагаар Монгол орны цэвдэгт бүсэд орших Хөвсгөл аймгийн Баянзүрх сумын хөрсний органик нүүрстөрөгчийн агууламжийн орон зайн тархалтын загварыг боловсруулж зураглах, таамаглагч хүчин зүйлсийн ач холбогдлыг илэрхийлэх, зураглалын үр дүнг үнэлж, цэвдгийн ялгаатай бүсүүдэд тархсан органик нүүрстөрөгч агууламжийг харьцуулахыг зорьсон. Ингэхдээ машин сургалтын санамсаргүй форест регрессийн аргыг ашигласан. Судалгааны талбайгаар Хөвсгөл аймгийн Баянзүрх сумын нутгийг төлөөлүүлэн авч 2022-2023 онд нийт 181 цэгээс хөрсний дээжийг цуглуулсан. Судалгааны үр дүнгээс харахад хөрсний органик нүүрстөрөгчийн агууламжийг санамсаргүй форест регрессийн аргаар таамагласан загвар нь шалгалтын багцын үнэлгээгээр 61%-ийг, сургалтын багцын үнэлгээгээр 83%-г тус тус тайлбарлаж байв. Загварт ашигласан 28-н хүчин зүйлсээс ургамлын нормчилсон ялгаат индекс, суваг 4, суваг 5, налуу зэрэг нь хамгийн өндөр ач холбогдолтой байсан. Харин хүчин зүйлсийг бүлгээр нь авч үзвэл оптикийн хиймэл

©Зохиогчийн оруулсан хувь нэмэр: **А.Маралмаа**: Онолын үндэслэл, аргазүй боловсруулалт, өгөгдлийн дүн шинжилгээ, үндсэн бичвэр, хээрийн судалгаа, зураглал боловсруулалт, **А.Саруулзаяа**: Онолын үндэслэл, үндсэн бичвэрийн засвар, үр дүнгийн хяналт, хээрийн судалгаа, **Ё.Пүрэвдулам**: Онолын үндэслэл, аргазүй боловсруулалт, хээрийн судалгаа, **Б.Батзориг**, **Г.Нэмэхбаяр**: Хээрийн судалгааг хийсэн.

дагуулд суурилсан хүчин зүйлс хамгийн өндөр ач холбогдолтой байсан. Зураглалын үр дүнд Баянзүрх сумын нийт газар нутгийн хөрсний органик нүүрстөрөгч агууламж 16.7г/кг - 395.9 г/кг - ийн хооронд хэлбэлзэж, дундаж агууламж 157.1 г/кг байсан бөгөөд цэвдгийн үргэлжилсэн тархалттай бүсэд хөрсний органик нүүрстөрөгчийн агууламжийн дундаж утга 170.9г/кг, тасалданги тархалттай бүсэд 136.0 г/кг, алаг цоог тархалттай бүсэд 122.2 г/кг байв.

**Түлхүүр үгс:** Цэвдэг, Хөрсний органик нүүрстөрөгчийн агууламж, Машин сургалт, Санамсаргүй форест, Орон зайн тархалт

### Abstract

The soil organic carbon is the core nutrient element, the main component of soil fertility, and directly affects the global carbon cycle. Due to low soil temperature and lack of water migration in permafrost, it created favorable conditions for the formation of the soil organic carbon in soils. The amount of the soil organic carbon density contained in permafrost region is three times greater than the resources of forest. According to create map of the spatial distribution on soil organic carbon content, its stocks can be calculated, and it will be important information for the carbon cycle in permafrost regions and their calculation. In this study, we aimed to create the spatial distribution mapping of soil organic carbon contents in permafrost zones, to identify the main drivers that affect, to test the performance, to identify the soil organic carbon content variability along different permafrost zones. The random forest regression method of machine learning was used. Study area Bayanzurkh soum in Khuvsgul province was selected as the study area and soil samples were collected from 181 study sites. As shown the results of the study, that the SOC contents based on random forest regression model is explained by 61% of the test dataset and 83% of the train dataset. From the 28 factors used in the model, Normalized Difference Vegetation Index, band 4, band 5 and slopes were most importance factors. Whereas, considering that the factors by group, the optical factors were most importance. According to the mapping result, the spatial distribution of the SOC contents in Bayanzurkh soum ranges between 16.7 g/kg and 395.9 g/kg with an average content of 157.1 g/kg. The SOC content in the continuous permafrost zone was average value of 170.9 g/kg, while its contents in the discontinuous zone 136.0 g/kg, and sporadic zone 122.2 g/kg.

**Keywords:** Permafrost, Soil organic carbon content, Machine learning, Random forest, Spatial distribution

### Оршил

Хөрс нь дэлхий дээрх хамгийн том нүүрстөрөгч шингээгч бөгөөд дэлхийн нүүрстөрөгчийн эргэлтэд ач холбогдолтой ба уур амьсгалын өөрчлөлтийг бууруулахад чухал нөлөө үзүүлдэг (Tifafti et al., 2018). Уур амьсгалын өөрчлөлтийн асуудлаарх Засгийн газар хоорондын зөвлөл (International Panel on Climate Change)-өөс гаргасан хүлэмжийн хийн тооллогын арга зүйн удирдамжид хөрсний 0-30 см гүнийг үндсэн гол үе давхарга гэж үздэг (Eggleston et al., 2006). Хөрсний органик нүүрстөрөгч (ХОН) нь хөрсний хуримтлал, ус хуримтлуулах чадвар, шим тэжээлийн бодисын хүртээмжээс үүдэлтэй ургамлын ургалтыг дэмжих зэрэгт чухал үүрэг гүйцэтгэдэг учраас хөрсний чанар, эрүүл хөрсний гол хүчин зүйл гэж үздэг (Edenhofer et al., 2011; Emadi et al., 2020; Grunwald et al., 2011; Khavtgai et al., 2022).

Цэвдэгт бүс нутаг нь хөрсний температур бага, усны шилжилт хөдөлгөөний дутмаг байдлаас шалтгаалсан олон сая жилийн хугацаан дахь хүлрийн хуримтлал, үлдэгдэл, криотурбац зэрэг үйл явцуудын улмаас их хэмжээний хөрсний органик нүүрстөрөгч хуримтлагдах нөхцөл бүрдсэн байдаг (Hugelius et al., 2014; Mishra et al., 2021; Саруулзаяа, 2023). Дэлхийн хэмжээнд цэвдэгт бүс нутгуудад ойролцоогоор 1307 Пг (Петта грамм =  $10^{15}$  г) хэмжээтэй хөрсний органик нүүрстөрөгч нөөц агуулагдаж байгаа нь ойн хөрсөнд агуулагдаж буй нөөцөөс гурав дахин, агаар мандал дахь нөөцөөс даруй хоёр дахин их байдаг (Hugelius et al., 2014; Tserengunsen et al., 2022).

ХОН нь хүрээлэн буй орчны хэд хэдэн хүчин зүйлээс шалтгаалан бүрэлдэн тогтдог. Тухайлбал хөрсний бүтэц, хөрсний хэв шинж, ургамалжилт, уур амьсгал, гадаргын хэв шинж, физик-химийн шинж чанар гэх мэт (McBratney et al., 2003; Sothe et al., 2022). Эдгээр гол хүчин зүйлсийг зөв тодорхойлох нь судалгааны үр дүн бодит гарахад хамгийн ихээр нөлөөлдөг. Мөн судлаачид хөрс үүсгэгч хүчин зүйлүүд дээр үндэслэн хөрсний дижитал зураглал хийхэд тохиромжтой загваруудыг боловсруулсан байдаг (Grunwald et al., 2011; Jenny, 1994; McBratney et al., 2003). Бид энэхүү судалгаанд цэвдэгт бүс нутгийн ХОН-ийн орон зайн тархалтыг зураглахад McBratney (2003) нарын боловсруулсан SCORPAN (хөрс-soil, уур амьсгал-climate, организм-organism, гадаргын хэв шинж-topography, суурь чулуулаг- parent material, насжилт- age болон орон зай-space) загварт суурилан таамаглагч хувьсагчдыг сонгосон. Энэ загвар нь орон зайн болон цаг

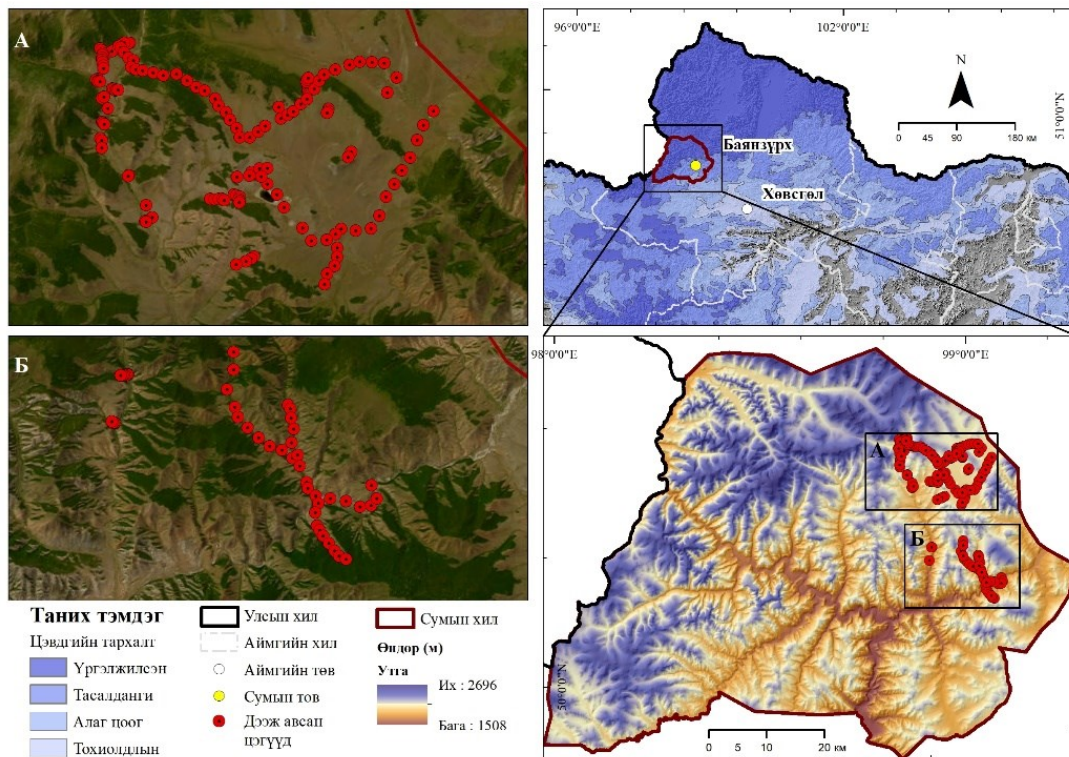
хугацааны хувьд тодорхой, байгаль орчны хүчин зүйлс, хөрсний өгөгдлийг нэгтгэх байдлаар дээж аваагүй газруудын хөрсний шинж чанарыг урьдчилан таамаглах боломжийг бүрдүүлдэг (Keskin et al., 2019; McBratney et al., 2003). Түүнчлэн ХОН нь дэлхийн нүүрстөрөгчийн эргэлтэд чухал ач холбогдолтой учраас орчин үед зайнаас тандан судлалын хөгжил дэвшилд тулгуурласан хөрсний дижитал зураглал эрчимтэй хөгжиж байна (McBratney et al., 2003; Minasny et al., 2013; Padarian et al., 2019). Тухайлбал, Google Earth Engine (GEE) нь олон нийтэд нээлттэй газарзүйн өгөгдлийн багцыг агуулдаг бөгөөд үүнд хиймэл дагуулын янз бүрийн системийн хүрээлэн буй орчин, уур амьсгал, газрын бүрхэвч, гадаргын хэв шинжийн урт хугацааны мэдээг агуулдаг мэдээллийн сан юм (Gorelick et al., 2017). Энэхүү мэдээллийн санг ашиглан бүс нутгийн болон үндэсний хэмжээнд машин сургалтын аргаар урьдчилан таамаглах хувьсагчдын хоорондох шугаман бус хамаарлыг үнэн зөв тодруулах, орон зайн тархалтыг таамаглах зэрэг чиглэлийн судалгаанууд ихээр хийгдэж байна (Emadi et al., 2020; Hengl et al., 2017; Padarian et al., 2019; Sothe et al., 2022).

Машин сургалт нь өгөгдсөн мэдээллийг тусгай зааварчилгаа, аргачлал ашиглахгүйгээр өгөгдлийн зүй тогтол, хэв шинж, холбоо хамаарлыг тогтоож, өөрөө өөрөөсөө суралцан судалдаг, процессын ирээдүйн чиг хандлага, хэтийг төлөвийг урьдчилан таамаглах чадвартай алгоритм юм. Машин сургалтыг сургалттай, сургалтгүй болон бататгасан ангилал гэж 3 хэсэгт хуваагддаг. Бид энэхүү судалгаандаа оролт гаралтын өгөгдлийг хамтад нь ашигладаг сургалттай ангилалын санамсаргүй форест (RF) регрессийн аргыг ашигласан. RF регрессийн арга нь санамсаргүй сонголтоор олон онцлог шинжүүдийн хосолмол байдлаар шийдвэрийн моднууд үүсгэж, олон боломжуудаас хамгийн оновчтойг сонгох замаар ажилладаг (Амарсайхан, 2023; Батсуурь, 2020). RF регрессийн аргын гол давуу тал нь гиперпараметрийг (hyperparameter) анхдагч байдлаар тохируулахад загварын гүйцэтгэлд төдийлөн нөлөөлдөггүй (Bentéjac et al., 2021). Бид хүчин зүйлсийн загварт үзүүлэх ач холбогдлыг үнэлэхийн тулд RFE (Recursive Feature Elimination) аргыг ашигласан. RFE нь хүчин зүйлсийн сонголтын арга бөгөөд хамгийн чухал ач холбогдолтой хүчин зүйлийг тодорхойлдог (Kuhn, 2008).

Энэхүү судалгааны зорилго нь (1) Монгол орны цэвдэгт бүсэд орших Хөвсгөл аймгийн Баянзүрх сумын газар нутгийн 0-30 см гүний ХОН-ийн агууламжийн орон зайн тархалтын загварыг боловсруулж зураглах, (2) таамаглагч хүчин зүйлсийн ач холбогдлыг тодорхойлох, (3) зураглалын үр дүнг үнэлж, (4) цэвдгийн ялгаатай бүсүүдэд тархсан органик нүүрстөрөгчийн агууламжийг харьцуулах юм.

### **Судалгааны талбай**

Судалгааны талбайгаар Хөвсгөл аймгийн Баянзүрх сумыг төлөөлүүлэн авч үзсэн (Зураг 1). Баянзүрх сум нь Хөвсгөлийн уулархаг бүс нутагт хамаарах цэвдгийн үргэлжилсэн, тасалданги, алаг цоог хэлбэрийн тархалттай (Жамбалжав, 2017; Жамбалжав et al., 2016; Yamkhin et al., 2022) Хөрс болон физик газарзүйн мужлалаар Хөвсгөлийн мужийн баруун тойрогт хамаарах бөгөөд өндөр уул, ой тайгад бараан, цэвдэгт, ширэгт, хүлэрлэг хөрс ихэвчлэн тархсан байдаг бол уулс хоорондын ам хөндийгөөр нуга-намгийн бараан хүлэрлэг хөрстэй (Батхишиг, 2016). Энэ сум нь өндөр уулын нуга, уулын тайга хосолсон уур амьсгал нь чийглэг хүйтэн, жилд унах хур тунадасны хэмжээ 250 – 300 мм, жилийн дундаж агаарын температур нь  $-4^{\circ}\text{C}$  - ( $-6^{\circ}\text{C}$ ) ургамал ургах хугацаа харьцангуй богино, дунджаар 90-115 хоног байдаг (Батчулуун, 2020; Доржготов, 2022).



Зураг 1. Хөвсгөл аймгийн Баянзүрх сумын цэвдгийн тархалт болон дээж авсан цэгүүдийн байршил: А. Доод, Дунд Тоом, Алтарга голын хөндий, Улаан тайга, Хөөөн нуур орчим, Б. Бэлтэг голын хөндий

### Судалгааны материал, арга зүй

Уур амьсгалын хүчин зүйлсийн хувьд Terra (Terra) хиймэл дагуулын дунд зэргийн нарийвчлалтай дүрсийн спекторрадиометр мэдрэгчийн (MODIS-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) дэлхийн хэмжээний газрын гадаргын температур ба гадаргын ойлгох чадвар (Land Surface Temperature and Emissivity Daily Global) бүтээгдэхүүнээс 2000-2023 оны 1 сараас 12 дугаар сарын дундаж газрын гадаргын температурын өдөр болон шөнийн мэдээг, дэлхийн хэмжээний 8 хоногийн дундаж нийт ууршилт (Net Evapotranspiration 8-Day Global) бүтээгдэхүүнээс 2000-2023 оны 6 сараас 8 дугаар сарын дундаж ууршилтын мэдээг Америкийн Сансар Судлалын Агентлагийн архивын мэдээллийн сангаас авч тус тус ашигласан. Дэлхийн цаг уурын орон зайн мэдээллийн сангаас (WorldClim 2.1) 1970-2000 оны 1 сараас 12 сарын агаарын температурын хамгийн их болон бага утга, хур тунадасны олон жилийн дундаж зэрэг мэдээг татан ашигласан. Мөн Ландсат-8 (Landsat-8 OLI/TIRS) хиймэл дагуулын 10, 11-р сувгуудын 2015-2023 оны 6 сараас 8 дугаар сарын дундаж мэдээг Америкийн Геологийн судалгааны төвийн мэдээллийн сангаас тус тус авч ашигласан.

Судалгаанд ашиглах оптикийн хиймэл дагуулд суурилсан хүчин зүйлсийн хувьд Ландсат-8 хиймэл дагуулын 2015-2013 оны 6 сараас 8 дугаар сарын үүлтэй хэсгийн утгыг хассан 4, 5, 6, 7 дугаар сувгуудын дундаж мэдээг ашигласан. Энэхүү сувгуудын тусламжтайгаар Ургамлын нормчилсон ялгаат индекс (NDVI-Normalized Difference Vegetation Index), Чийгийн нормчилсон ялгаат индекс (NDMI-Normalized Difference Moisture Index), Усны нормчилсон ялгаат индекс (NDWI-Normalized Difference Water Index) зэрэг индексүүдийг тооцоолон ашигласан.

Газрын гадаргын өндөршил, хотгор гүдгэр зэрэг гадаргын хэв шинжийн хүчин зүйлсийг Японы Сансар судлалын агентлагийн Дэлхийн ажиглалтын төвийн мэдээллийн сангаас (ALOS Palsar) хиймэл дагуулын гадаргын тоон загвар (DSM-Global Digital Surface Model) 30 м

нарийвчлалтай мэдээг ашиглан газрын гадаргын өндөршил, налуу, зүг зовхис, нарны цацраг, байрзүйн чийгийн индекс (TWI-Topographic Wetness Index) болон байрзүйн байрлалын индекс (TPI-Topographic Position Index) зэргийг тооцсон. Харин олон шийдийн оройн тэгшрэлийн индекс (MRVBF-Multiresolution Valley Bottom Flatness Index) болон олон шийдийн хөндийн тэгшрэлийн индекс (MRRTF-Multiresolution Ridge Top Flatness Index) зэргийг SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) бүтээгдэхүүн болох өндрийн тоон загварын мэдээг ашиглан боловсруулсан.

Мөн хөрсний 0-30 см гүний эзлэхүүн жин, шавар болон тоосны агууламж зэрэг хөрсний шинж чанарын хүчин зүйлсийг (SoilGrids 2.0) мэдээллийн сангаас татан ашигласан.

Загварт ашигласан оролтын таамаглагч хүчин зүйлс нь растер өгөгдөлтэй бөгөөд өөр хоорондоо ялгаатай орон зайн шийдтэй учраас тэдгээрийг ArcGIS программ хангамжийг ашиглан 30м×30м орон зайн шийд рүү resample аргыг ашиглан боловсруулсан. Ингэхдээ ойр хөрш (Nearest Neighbor), хос шугаман интерполяцийн (Bilinear Interpolation) аргаар хөрвүүлсэн. Хүснэгт 1-д судалгаанд ашигласан өгөгдлийн орон зайн шийд, хугацаа зэргийг харуулав. Дээрх өгөгдлийг GEE ашиглан татаж, боловсруулалт хийсэн.

Хүснэгт 1. ХОН-ийн зураглалд ашигласан материал

Таамаглагч хүчин зүйл	Орон зайн шийд (м)	Нэгж	Эх сурвалж
<b>Уур амьсгалын хүчин зүйлс</b>			
Агаарын температурын их утга (Tmax)	1000	°C	(WorldClim 2.1: Current Conditions (1970-2000)., n.d.)
Агаарын температурын бага утга (Tmin)			
Хур тунадасны олон жилийн дундаж (PR)		мм	
Газрын гадаргын өдрийн температур (LSTd)	1000	K	NASA LP DAAC (Running et al., 2021; Wan et al., 2021)
Газрын гадаргын шөнийн температур (LSTn)			
Ууршилт (ET)	500	кг/м <sup>2</sup> /8 өдөр	
Суваг 10 (B10)	30	K	(U.S. Geological Survey, 2015)
Суваг 11 (B11)			
<b>Оптикийн хиймэл дагуулд суурилсан хүчин зүйлс</b>			
Чийгийн нормчилсон ялгаат индекс (NDMI)	30	-	(U.S. Geological Survey, 2015)
Ургамлын нормчилсон ялгаат индекс (NDVI)			
Усны нормчилсон ялгаат индекс (NDWI)			
Суваг 4 (B4)			
Суваг 5 (B5)			
Суваг 6 (B6)			
Суваг 7 (B7)			

Гадаргын хэв шинжийн хүчин зүйлс			
Өндөршил (E)	30	м	JAXA Earth Observation Research Center (Tadono et al., 2016)
Налуу (SP)		°	
Нарны цацраг (SR)		Вт.ц/м <sup>2</sup>	
Зүг чиг (LA)		-	
Байрзүйн байрлалын индекс (TPI)		-	
Байрзүйн чийгийн индекс (TWI)		-	
Олон шийдийн оройн тэгшрэлийн индекс (MRRTF)	90	-	U.S. Geological Survey (Earth Resources Observation And Science (EROS) Center, 2017; Farr et al., 2007; Gallant & Dowling, 2003)
Олон шийдийн хөндийн тэгшрэлийн индекс (MRVBF)		-	
Ангиллын хүчин зүйлс			
Хөрсний хэв шинжийн ангилал (ST)	-	-	(Батхишиг et al., 2021)
Газар бүрхэвчийн ангилал (LC)	30	-	(Global Land Analysis & Discovery (GLAD), University of Maryland, 2020)
Хөрсний шинж чанарын хүчин зүйлс			
Эзлэхүүн жин (BK)	1000	цг/см <sup>3</sup>	(ISRIC – World Soil Information, 2023)
Шаврын агууламж (CL)		г/кг	
Тоосны агууламж (SL)		г/кг	

**Хээрийн хэмжилт, лабораторийн шинжилгээ:** Хээрийн судалгаагаар Хөвсгөл аймгийн Баянзүрх сумын нутагт 2022 онд Доод, Дунд Тоом болон Бэлтэс голын хөндий, уулс хоорондын томоохон хотос, уулын ар, өвөр, энгэрт 100 цэгээс, 2023 онд Улаан Тайга, Хөөөн нуур орчим, Алтарга голын хөндийд 81 цэгээс хөрсний дээжийг 0-10 см, 10-15 см, 15-20 см, 20-30 см-ийн ижил гүн тус бүрээс цуглуулсан. Нийт 181 судалгааны цэгээс авсан дээжүүдийн ХОН-ийн агууламжийн үр дүнг жигнэсэн дунджийн аргаар дундажлан 0-30 см утгыг ашигласан.

Хөрсний лабораторийн шинжилгээг ШУА-ийн Газарзүй, геоэкологийн хүрээлэнгийн Хөрс судлалын салбарын лабораторид “Шатаалтын алдагдлын арга”-аар ХОН-ийн агууламжийг тодорхойлсон. Шатаалтын алдагдлын арга нь хөрс эсвэл хурдас дахь бүх органик бодисыг халааж, устгах явдал юм. Органик нүүрстөрөгч нь 360°C-т шатаах зууханд 2 цаг шатаахад нүүрсхүчлийн хий болж бүрэн исэлддэг. Энэ урвалаас үүссэн жингийн алдагдал буюу шатаахын өмнөх ба дараах дээжийн жинг хэмжихэд хялбар байдаг. ХОН-ийн агууламжийг тодорхойлохдоо дээжийн эхний ба эцсийн жингийн зөрүүг дээжийн анхны жинд хуваан 100%-д үржүүлж тооцно (Batkhisig et al., 2021).

$$\text{ШГА, \%} = \frac{(M_1 - M_2) * 100}{(M_1 - M_c)} \tag{1}$$

ШГА-Шатаахад гарах алдагдлын хувь (%)

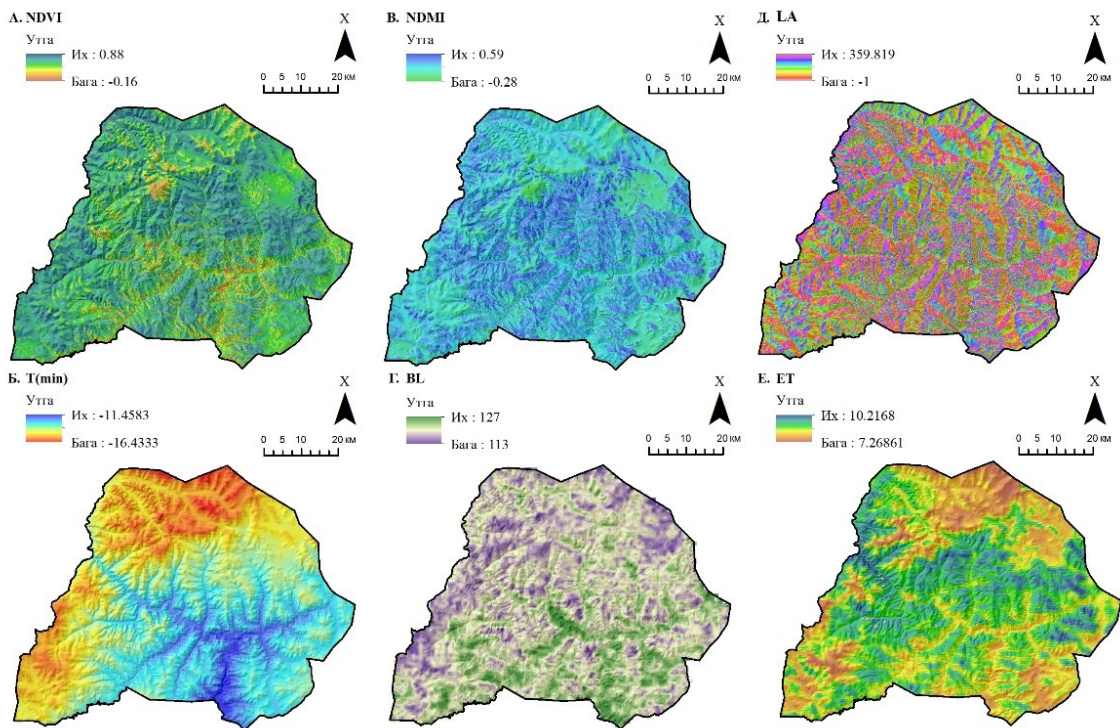
M<sub>1</sub>-Шатаахын өмнөх хөрстэй тигелийн жин (г)

M<sub>2</sub>-Шатаасны дараах хөрстэй тигелийн жин (г)

M<sub>c</sub>-Тигелийн жин (г)

**Хүчин зүйлсийн сонголт:** Энэхүү судалгаанд ашигласан ХОН-ийн агууламжийн орон зайн тархалтад ач холбогдолтой хүчин зүйлүүдийг SCORPAN загварт үндэслэн нийт 5 бүлэгт хамааруулан сонгосон. Үүнд: 1) уур амьсгалын хүчин зүйлс 2) оптикийн хиймэл дагуулын мэдээнд суурилсан хүчин зүйлс 3) гадаргын хэв шинжийн хүчин зүйлс 4) ангиллын хүчин зүйлс буюу хөрсний хэв шинжийн ангилал ба газар бүрхэвчийн ангилал; 5) хөрсний шинж чанарын хүчин зүйлс буюу эзлэхүүн жин, шаврын агууламж, тоосны агууламж юм.

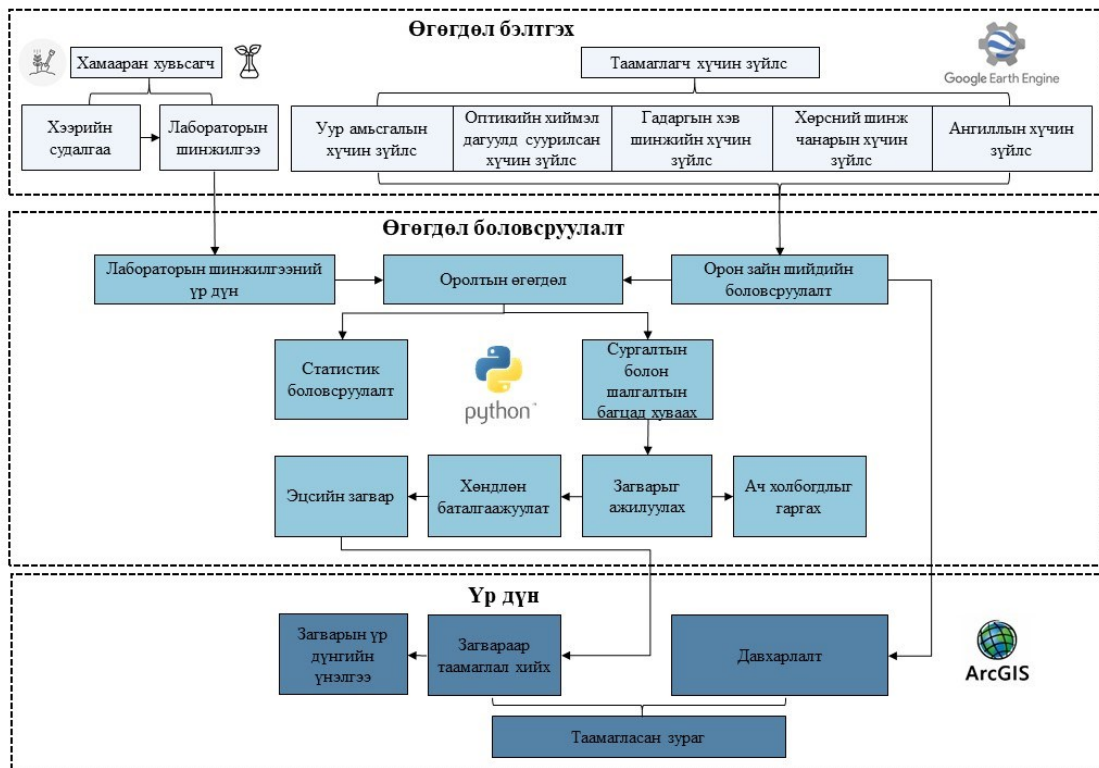
Судалгаанд ашигласан ХОН-ийн агууламжийн орон зайн тархалтад нөлөөлөх зарим хүчин зүйлүүдийн орон зайн тархалтыг Зураг 2-т харуулав.



Зураг 2. Судалгаанд ашигласан зарим хүчин зүйлс:  
 А. NDVI, Б.Т(min), В.NDMI, Г. BL, Д. LA, Е. ET

Бид энэхүү судалгааны ажлыг аргазүйн хувьд үндсэн гурван үе шаттайгаар хийж гүйцэтгэж аргазүйн схемийг Зураг 3-т үзүүлэв. Үүнд:





Зураг 3. Судалгааны аргазүйн бүдүүвч

Нэгдүгээрт өгөгдөл бэлтгэх буюу хамааран хувьсагч болон таамаглагч хүчин зүйлсийн боловсруулалтыг хийж оролтын өгөгдлийг бэлтгэсэн. Мөн хөрсний лабораторийн шинжилгээний гүн тус бүрийн дундаж утга, хамгийн их, бага утга, стандарт хазайлт зэрэг үзүүлэлтүүдийг тооцсон.

Хоёрдугаарт өгөгдөл боловсруулалт буюу оролтын өгөгдлийг ашиглан загвар ажиллуулах үйл явц. Загвар ажиллуулахын өмнө оролтын өгөгдлийг сургалтын ба шалгалтын өгөгдөл буюу нийт өгөгдлийн 80%, 20%-иар тус тус хуваасан. Өгөгдлийн 80%-иар загварыг сургаж, үлдсэн 20%-иар загварын гүйцэтгэлийг үнэлсэн. Судалгаанд ашигласан RF регрессийн алгоритмыг Python 3.11 программчлалын хэл ашиглан гүйцэтгэсэн. Загварт ашигласан зарим гиперпараметрийг Хүснэгт 2-т харуулав. RF регрессийн аргын гиперпараметрийг тохируулж загварыг ажиллуулж загварт ашигласан нийт хүчин зүйлсийн ач холбогдлыг RFE-ээр тооцож гаргасан.

Хүснэгт 2. RF регрессийн аргын зарим гиперпараметр

Гиперпараметрийн нэр	Тогтмол утга	Тайлбар
n_estimators	default=100	Модны тоо
criterion	default="squared_error"	Багц тус бүрийг хуваахад ашиглах шалгуур
max_depth	default=None	Модны гүн буюу шийдлийн түвшний тоо
max_features	default=1.0	Хамгийн сайн дэд багцад хуваахад модонд оролцох хувьсагчийн тоо
random_state	default=None	Санамсаргүй байдлын үрийн тоо
min_samples_split	default=2	Дотоод багцыг хуваахад шаардагдах хамгийн бага өгөгдлийн тоо
min_samples_leaf	default=1	Навчинд байх хамгийн бага өгөгдлийн тоо

Гуравдугаарт үр дүн буюу загварын үр дүнгийн үнэлгээний үйл явц. Хүчин зүйлсийн ач холбогдлын дараалалд үндэслэн растер мэдээг ArcGIS программын Composite Bands командаар олон суваг бүхий нэг растер болгон давхарласан. Загварын гүйцэтгэлийг үнэлэхдээ шалгалтын өгөгдлийг ашиглан детерминацийн коэффициент ( $R^2$ ), дундаж абсолют алдаа (MAE) болон дундаж алдааны язгуур (RSME) алдаануудыг тус тус тооцоолсон.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{2}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \tag{3}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{4}$$

$y_i$  = хэмжсэн утга

$\hat{y}_i$  = таамагласан утга

$\bar{y}$  = хэмжилтийн утгын дундаж

$n$  = түүврийн тоо

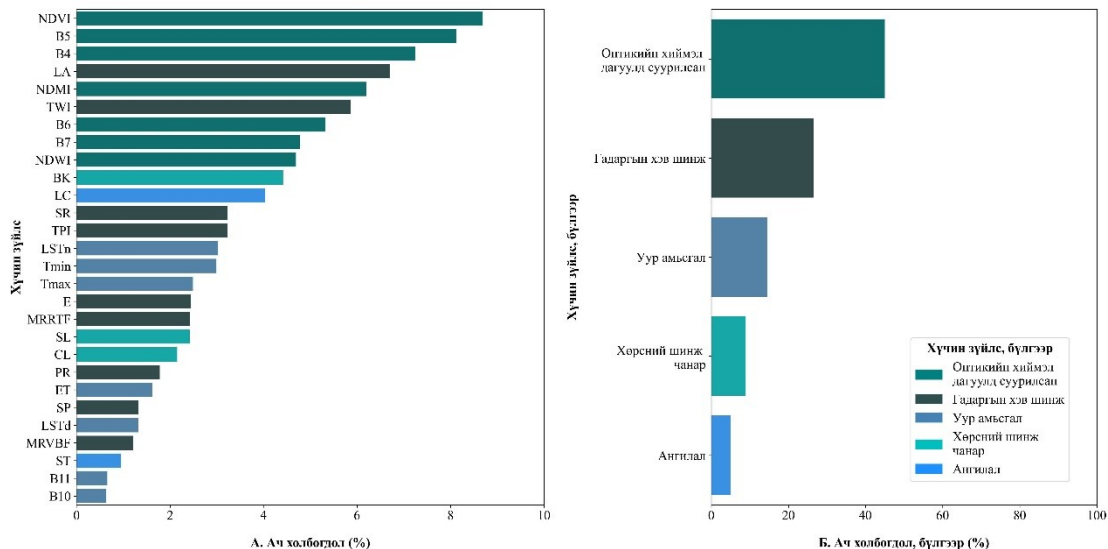
### Судалгааны үр дүн ба хэлэлцүүлэг

**Лабораторийн болон загварын үр дүн:** Судалгааны цэгүүдийн 0-10 см, 10-15 см, 15-20 см, 20-30 см-ийн гүн дэх болон жигнэсэн дунджаар дундажласан 0-30 см-ийн ХОН-ийн агууламжийн статистик үзүүлэлтийг Хүснэгт 3-т үзүүлэв. 0-30 см-ийн ХОН-ийн агууламж 15.5 г/кг-482.7 г/кг-ийн хооронд хэлбэлзэж дундаж утга нь 148.6 г/кг, стандарт хазайлт нь 115.0 байна

Хүснэгт 3. Судалгааны цэгүүдийн гүн тус бүрийн ХОН-ийн агууламжийн статистик үзүүлэлт

Гүн (см)	Дээжийн тоо	Хамгийн их утга (г/кг)	Хамгийн бага утга (г/кг)	Дундаж утга (г/кг)	Стандарт хазайлт
0-10	(181)	995.9	10.7	256.2	219.0
10-15	(181)	519.7	17.5	143.4	103.7
15-20	(181)	548.6	3.2	100.5	91.5
20-30	(181)	585.7	0.9	67.5	92.3
0-30	(181)	482.7	15.5	148.6	115.0

RF регрессийн аргаар Баянзүрх сумын нийт газар нутгийн ХОН-ийн агууламжийн орон зайн тархалтыг таамаглах загварт уур амьсгал, гадаргын хэв шинж, оптикийн хиймэл дагуулд суурилсан хүчин зүйлс, ангиллын хүчин зүйлс болон хөрсний шинж чанарын хүчин зүйлсийн ач холбогдлыг тодорхойлж, загварын үр дүнг үнэлэв. Загварт нийт 28-н хүчин зүйлсийг RFE ашиглан эрэмбэлсэн ба ач холбогдлыг Зураг 4-г харуулав.



Зураг 4. А. Хүчин зүйлсийн ач холбогдол, хувиар Б. Хүчин зүйлсийн ач холбогдол, бүлгээр, хувиар

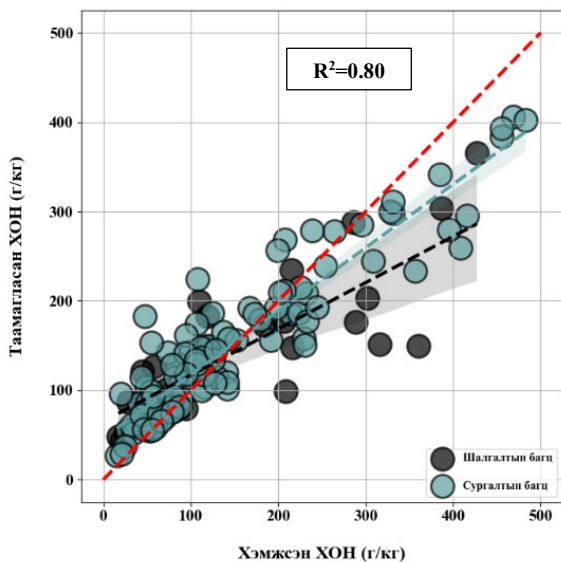
RFE-д үндэслэн нийт хүчин зүйлсийг загварыг тайлбарлах хувиар нь ихээс бага руу жагсаахад хамгийн өндөр нь NDVI нь 8.6 %, Суваг 5 нь 8.1 %, Суваг 4 нь 7.2 %, Налуу 6.6 %-ийн ач холбогдолтой байсан. Хүчин зүйлс тус бүрийн загварт үзүүлэх ач холбогдлыг хувиар нь эрэмбэлсний дараагаар бүлэг тус бүрийн ач холбогдлыг эрэмбэлэв. ХОН-ийн агууламжид оптикийн хиймэл дагуулд суурилсан хүчин зүйлс 45.0 %, гадаргын хэв шинжийн хүчин зүйлс 26.5 %, уур амьсгалын хүчин зүйлс 14.5 %, хөрсний шинж чанарын хүчин зүйлс 8.9 %, ангиллын хүчин зүйлс 4.9 %-ийн ач холбогдолтой байна.

Загварын гиперпараметрийг  $n\_estimators=10$ ,  $max\_depth=10$ ,  $random\_state=105$ -аар тохируулж, бусад үзүүлэлтийг тогтмол утгаар нь тохируулж ажилуулсан. Загварын оролтын өгөгдлийн шалгалтын багц болон сургалтын багц тус бүрд үнэлсэн гүйцэтгэлийг Хүснэгт 4-т харуулав. Энд шалгалтын багцын үнэлгээгээр ХОН-ийн хэмжилтийн 61 % ( $R^2=0.61$ )-ийг загвар тайлбарлаж байна. Сургалтын багцын үнэлгээгээр ХОН-ийн хэмжилтийн 83 % ( $R^2=0.83$ )-ийг загвар тайлбарлаж байна.

Хүснэгт 4. Сургалтын болон шалгалтын багцын үнэлгээ

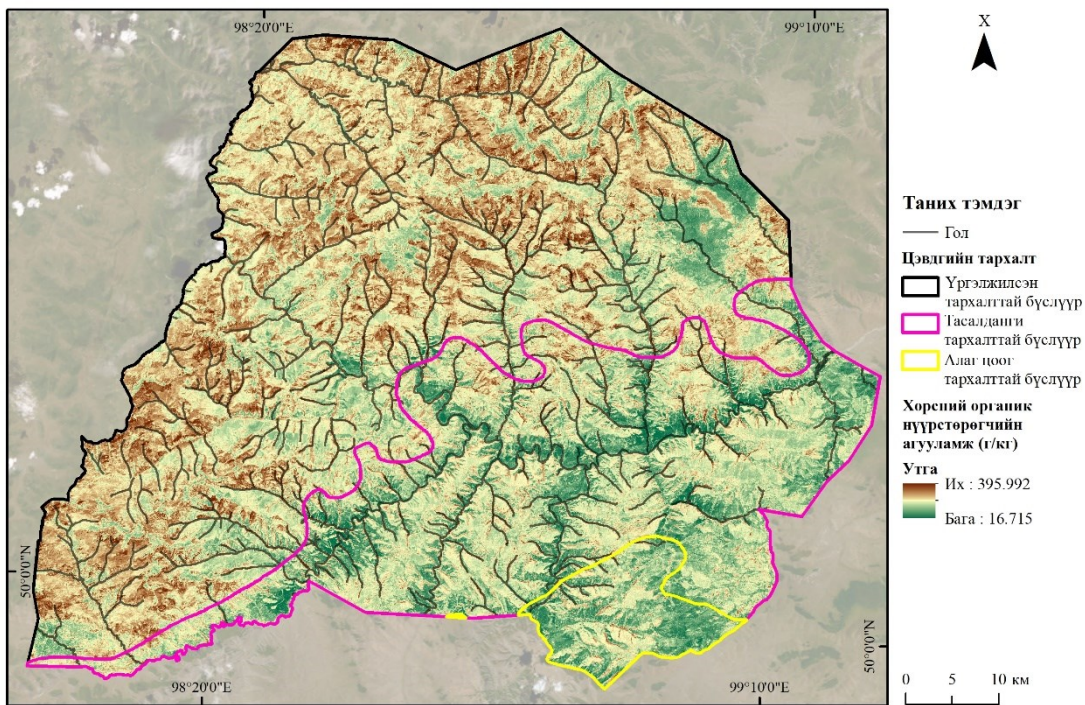
Шалгалтын багцын үнэлгээ		Сургалтын багцын үнэлгээ	
<b>R<sup>2</sup></b>	0.61	<b>R<sup>2</sup></b>	0.83
<b>MAE (г/кг)</b>	58.1	<b>MAE (г/кг)</b>	33.5
<b>RMSE (г/кг)</b>	75.7	<b>RMSE (г/кг)</b>	46.3

Загвараар таамагласан утга болон хэмжилтийн утгын хоорондох шугаман регрессийн хамаарлыг Зураг 5-т харуулав. Таамагласан утга болон хэмжилтийн утгын хоорондын хамаарлыг шугаман регрессийн аргаар тооцоход  $R^2=0.80$  байв. Хэмжсэн болон таамагласан ХОН-ийн агууламжийн дунжийн зөрүү 4.36 г/кг буюу загвараар таамагласан ХОН-ийн агууламжийн дундаж нь хэмжсэн утгаас 4.36 %-иар их бол, хамгийн их утгын зөрүү 49.1 %-иар бага, хамгийн бага утгын зөрүү 6.21 хувиар их байна.



Зураг 5. Таамагласан ХОН-ийн агууламжийн утга болон хэмжсэн ХОН-ийн агууламжийн утгын шугаман регрессийн хамаарал

**ХОН-ийн орон зайн тархал:** Энэхүү судалгаанд машин сургалтын санамсаргүй форест регрессийн аргыг ашиглан Монгол орны цэвдгийн үргэлжилсэн, тасалданги, алаг цоог тархалттай бүсэд орших Хөвсгөл аймгийн Баянзүрх сумын газар нутгийн 0-30 см гүний ХОН-ийн агууламжийн орон зайн тархалтын зураглав (Зураг 6). Зураглалын үр дүнд Баянзүрх сумын нийт газар нутгийн хэмжээд ХОН-ийн агууламжийн тархалт 16.7 г/кг- 395.9 г/кг-ийн хооронд хэлбэлзэж, дундаж агууламж 157.1 г/кг, стандарт хазайлт 45.1 байсан.



Зураг 6. Хөвсгөл аймгийн Баянзүрх сумын цэвдгийн тархалтын хил болон ХОН-ийн агууламжийн орон зайн тархалт

Монгол орны цэвдгийн үргэлжилсэн тархалттай бүсэд буюу Баянзүрх сумын баруун хойд болон баруун урд хэсгээр ХОН-ийн агууламж 24.2 г/кг-395.9 г/кг хооронд хэлбэлзэж, дундаж утга нь 170.9 г/кг байна. Харин сумын зүүн болон зүүн урд хэсгээр цэвдгийн тасалданги, алаг цоог тархалттай бүсэд ХОН-ийн агууламж 16.7 г/кг -387.0 г/кг хооронд хэлбэлзэж, дундаж утга нь 136.0 г/кг байна.

Хүснэгт 5. ХОН-ийн агууламж ба цэвдгийн тархалтын бүс, статистик үзүүлэлт

№	Цэвдгийн тархалт	Хамгийн их утга (г/кг)	Хамгийн бага утга (г/кг)	Дундаж утга (г/кг)	Стандарт хазайлт
1	Үргэлжилсэн тархалттай	395.9	24.2	170.9	40.8
2	Тасалданги тархалттай	377.0	16.7	136.0	42.3
3	Алаг цоог тархалттай	387.0	18.6	122.2	41.3

Монгол орны хувьд ХОН-ийн агууламжтай холбогдолтой хэд хэдэн томоохон судалгаа хийгдсэн байдаг. Тухайлбал (Батхишиг нар, 2021) нарын судалгаанаас үзвэл Хөвсгөл аймгийн Баянзүрх сумын цэвдгийн үргэлжилсэн тархалттай бүсэд тайгын цэвдэгт, тайгын ширэгт, уулын хүлэрлэг цэвдэгт хөрс зонхилдог гэж тодорхойлсон байдаг бөгөөд эдгээр хөрсөнд ХОН-ийн агууламж 200 г/кг-иас их байдаг (Батхишиг, О., 2016). Харин уг сумын газар нутагт тархсан цэвдгийн тасалданги, алаг цоог тархалттай бүсэд аллювийн бараан, уулын бараан, чулуурхаг бараан хөрс зонхилдог ба аллювийн ХОН-ийн агууламж 30.1 г/кг, уулын бараан ХОН-ийн агууламж 16.7 г/кг-140.0 г/кг тус тус байдаг (Батхишиг, 2016). Дээрх судалгааны үр дүн нь хээрийн хэмжилтийн мэдээнд үндэслэн лабораторийн үр дүнгээр тооцон уламжлалт аргаар зурагласан байдаг. Харин бид энэхүү судалгаагаар хээрийн хэмжилтийн мэдээг лабораторийн шинжилгээний үр дүнгээр баталгаажуулж, машин сургалтын аргыг ашиглаж ХОН-ийн агууламжийн орон зайн тархалтыг зурагласнаараа бусад хөрсний зураглалаас шинэлэг юм.

Олон улсад бүс нутгийн болон үндэсний хэмжээнд ХОН-ийн агууламжийг зурагласан судалгаанууд нь зайнаас тандан судлалын өгөгдлүүдийг машин сургалтын аргуудтай хослуулан ашигласаар байна (Anda et al., 2021; Hird et al., 2017). Жишээлбэл Sothe et al., (2022) нар дэлхийн бөмбөрцгийн хойд хагаст орших Канадын цэвдэгтэй бүсэд ХОН-ийн агууламжийн зураглалд машин сургалт болон хиймэл дагуулын мэдээ ашиглан тархалтыг зурагласан байдаг. Харин тухайн улсын хувьд цэвдэг нь нийт газар нутгийн  $3.0 \times 10^6$  км<sup>2</sup> -  $4.0 \times 10^6$  км<sup>2</sup> талбайд тархалттай буюу 34–46% -ийг эзэлдэг (Obu et al., 2019). Дээрх судалгаанд хөрсний мэдээллээс гадна зайнаас тандан судлалын ажиглалтын үр дүнд олж авсан 25-н төрлийн орон зайн таамаглагч хүчин зүйлсийг 1 м хүртэлх 6 өөр гүний ялгаатай ХОН-ийн агууламжийн тархалтыг зурагласан. Судалгааны үр дүнд шалгалтын багцын үнэлгээгээр RF регрессийн арга нь ХОН-ийн агууламжийг 72%-ийг тайлбарлаж байсан. Энэхүү судалгаанаас харахад гадаргын температур нь ХОН-ийн агууламжийн тархалтыг урьдчилан таамаглахад хамгийн чухал үзүүлэлт бол түүний дараа өндөршил ба хур тунадас зэрэг орж байсан.

Бидний судалгаа нь олон улсад өргөн ашиглаж буй аргагүйгээр Монгол орны цэвдэгтэй бүс нутгийг төлөөлүүлэн Хөвсгөл аймгийн Баянзүрх сумын нутаг дэвсгэрийн ХОН-ийн агууламжийн орон зайн тархалтыг зурагласан нь шинэлэг төдийгүй цэвдгийн ялгаатай бүсүүдийн ХОН-ийн агууламжийн утгыг тодорхойлсноороо ач холбогдолтой юм.

### Дүгнэлт

Монгол орны цэвдгийн үргэлжилсэн болон тасалданги, алаг цоог тархалттай бүсэд орших Хөвсгөл аймгийн Баянзүрх сумын 0-30 см гүний ХОН-ийн агууламжийн орон зайн тархалтыг лабораторийн үр дүн болон SCORPAN загварт суурилан сонгосон зайнаас тандан судлалын 28-н

хүчин зүйлээр RF регрессийн арга ашиглан зураглав. ХОН-ийг RF регрессийн аргаар таамагласан загвар нь шалгалтын багцын үнэлгээгээр 61 %-ийг, сургалтын багцын үнэлгээгээр 83 %-ийг тус тус тайлбарлаж байв. Харин таамагласан утга болон хэмжилтийн утгын хоорондын хамаарлыг шугаман регрессийн аргаар тооцоход ( $R^2=0.80$ ) байв. Загварт ашигласан 28-н хүчин зүйлсээс NDVI, суваг 4, суваг 5, налуу зэрэг хамгийн өндөр ач холбогдолтой байсан. Мөн хүчин зүйлсийг бүлгээр нь ангилахад ХОН-ийн агууламжийг тайлбарлахад оптикийн хиймэл дагуулд суурилсан хүчин зүйлс хамгийн өндөр ач холбогдолтой байсан. Зураглалын үр дүнд Баянзүрх сумын ХОН-ийн агууламжийн орон зайн тархалт 16.7 г/кг- 395.9 г/кг-ийн хооронд хэлбэлзэж, дундаж агууламж 157.1 г/кг байсан бөгөөд цэвдгийн үргэлжилсэн тархалттай бүсэд ХОН-ийн агууламжийн дундаж утга 170.9 г/кг, тасалданги тархалттай бүсэд 136.0 г/кг, алаг цоог тархалттай бүсэд 122.2 г/кг тус тус байв.

Бидний энэхүү судалгаа нь Хөвсгөл аймгийн Баянзүрх сумын нутаг дэвсгэрийн үргэлжилсэн, тасалданги, алаг цоог тархалттай бүсүүдэд ХОН-ийн агууламжийн орон зайн тархалтыг машин сургалт, зайнаас тандан судлалтай хослуулан зурагласан нь чухал ач холбогдолтой байсан. Судалгааны талбайн цэвдгийн ялгаатай бүс тус бүрийн ХОН-ийн агууламжийн утгыг зурагласнаар нүүрстөрөгчийн нөөцийг тооцож, цаашлаад цэвдэгт бүс нутгийн нүүрстөрөгчийн эргэлт, тэдгээрийн тооцоо судалгаанд чухал ач холбогдолтой мэдээлэл болно.

## Талархал

Энэхүү судалгааг ШУТС-ийн санхүүжилтээр 2022-2024 оны хооронд хэрэгжиж буй ШУТБИХХЗГ-2022/154 дугаартай “Цэвдгийн алдралын нөлөөгөөр ялгарах хүлэмжийн хийн ирээдүйн хандлагыг загварчлах нь” суурь судалгааны төслийн санхүүжилтийн хүрээнд хийж гүйцэтгэв.

## Ном зүй

1. Амарсайхан, Д. (2023). *Орчин үеийн радарын тандан судлал, радарын мэдээнд боловсруулалт хийх зарчмууд*. Улаанбаатар хот
2. Батсуурь, Д. (2020). *Даатгуулагчийн эрсдэлийг машин сургалтаар үнэлэх*. Хүмүүнлэгийн Ухааны Их Сургуулийн Бизнесийн Тэнхим, Санхүү Эдийн Засгийн Тэнхим, Улаанбаатар хот.
3. Батхишиг, О. (2016). Монгол орны хөрсний ангилал. *Монголын Хөрс Судлал Сэтгүүл*, 01, 18–31.
4. Батхишиг, О., Доржготов, Д., Золжаргал, Х., Оюунбат, П., Ганзориг, Ө., Бямбаа, Г., Болормаа, Ц., Золзаяа, М., Ихбаяр, Д., Элбэгзаяа, Г., Самдандорж, М., Тэлмэн, Т., & Пүрэвдорж, Ц. (2021). *Хөрсний органик нүүрстөрөгчийн өөрчлөлт, түүнд нөлөөлөх хүчин зүйлс*, Суурь судалгааны төслийн тайлан, Улаанбаатар хот.
5. Батчулуун, Е. (2020). *Монгол орны физик газарзүй*, Мөнхийн үсэг ХХК.
6. Д. Доржготов. (2022). *Монгол Улсын Үндэсний Атлас* (3 дахь хэвлэл) [Map]. Монгол улсын Шинжлэх ухааны академийн Газарзүй, геоэкологийн хүрээлэн, Улаанбаатар хот.
7. Жамбалжав, Я. (2017). *Монгол орны цэвдгийн тархалт, өөрчлөлт*. “Колорфул” ХХК, Улаанбаатар хот.
8. Жамбалжав, Я., Гансүх, Я., Тэмүүжин, Х., Цогт-Эрдэнэ, Г., Ундрахцэцэг, Ц., Саруулзаяа, А., Амарбаясгалан, Ё., Дашцэрэн, А., & Нарангэрэл, С. (2016). *Монгол орны цэвдгийн тархалтын зураг (1: 1,000,000)* [Map], Улаанбаатар хот.
9. Саруулзаяа, А. (2023). *Цэвдгийн өөрчлөлт бидний амьдралд*. “Мөнхийн Үсэг” ХХК, Улаанбаатар хот.
10. Ventéjac, C., Csörgö, A., & Martínez-Muñoz, G. (2021). A comparative analysis of gradient boosting algorithms. *Artificial Intelligence Review*, 54(3), 1937–1967. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09896-5>

11. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., von Stechow, C., & others. (2011). *Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
12. Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
13. Emadi, M., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Cherati, A., Danesh, M., Mosavi, A., & Scholten, T. (2020). Predicting and Mapping of Soil Organic Carbon Using Machine Learning Algorithms in Northern Iran. *Remote Sensing*, 12(14), 2234. <https://doi.org/10.3390/rs12142234>
14. Gallant, J. C., & Dowling, T. I. (2003). A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39(12), 2002WR001426. <https://doi.org/10.1029/2002WR001426>
15. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
16. Grunwald, S., Thompson, J. A., & Boettinger, J. L. (2011). Digital Soil Mapping and Modeling at Continental Scales: Finding Solutions for Global Issues. *Soil Science Society of America Journal*, 75(4), 1201–1213. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0025>
17. Global Land Analysis & Discovery (GLAD), University of Maryland. (2020). GLAD Global Forest Change. University of Maryland. Retrieved from <https://glad.umd.edu>
18. Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), 2005RG000183. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
19. ISRIC – World Soil Information. (2023). *SoilGrids - global gridded soil information*. ISRIC – World Soil Information. Retrieved from <https://www.isric.org>
20. Hengl, T., Mendes De Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *Plos One*, 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
21. Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J. W., Schuur, E. A. G., Ping, C.-L., Schirrmeister, L., Grosse, G., Michaelson, G. J., Koven, C. D., O'Donnell, J. A., Elberling, B., Mishra, U., Camill, P., Yu, Z., Palmtag, J., & Kuhry, P. (2014). Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*, 11(23), 6573–6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
22. Jenny, H. (1994). *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. Courier Corporation.
23. Keskin, H., Grunwald, S., & Harris, W. G. (2019). Digital mapping of soil carbon fractions with machine learning. *Geoderma*, 339, 40–58. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.037>
24. Khavtgai, Z., Damba, I., & Tserengunsen, P. (2022). Effect of land use on soil organic carbon fractions. *Mongolian Journal of Geography and Geocology*, 92–99. <https://doi.org/10.5564/mjgg.v59i43.2516>
25. Kuhn, M. (2008). Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software*, 28(5). <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
26. McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1–2), 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
27. Minasny, B., McBratney, A. B., Malone, B. P., & Wheeler, I. (2013). Digital mapping of soil carbon. *Advances in Agronomy*, 118, 1–47. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405942-9.00001-3>

28. Mishra, U., Hugelius, G., Shelef, E., Yang, Y., Strauss, J., Lupachev, A., Harden, J. W., Jastrow, J. D., Ping, C.-L., Riley, W. J., Schuur, E. A. G., Matamala, R., Siewert, M., Nave, L. E., Koven, C. D., Fuchs, M., Palmtag, J., Kuhry, P., Treat, C. C., ... Orr, A. (2021). Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks. *Science Advances*, 7(9), eaaz5236. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5236>
29. Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2019). Using deep learning for digital soil mapping. *Soil*, 5(1), 79–89. <https://doi.org/10.5194/soil-5-79-2019>
30. Sothe, C., Gonsamo, A., Arabian, J., & Snider, J. (2022). Large scale mapping of soil organic carbon concentration with 3D machine learning and satellite observations. *Geoderma*, 405, 115402. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115402>
31. Running, S., Mu, Q., & Zhao, M. (2021). *MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 [Dataset]*. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.061>
32. Tadono, T., Nagai, H., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., & Iwamoto, H. (2016). Generation of the 30 M-mesh global digital surface model by ALOS PRISM. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 41, 157-162. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B4-157-2016>
33. Tifafi, M., Guenet, B., & Hatté, C. (2018). Large differences in global and regional total soil carbon stock estimates based on SoilGrids, HWSD, and NCSCD: Intercomparison and evaluation based on field data from USA, England, Wales, and France. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(1), 42–56.
34. Tserengunsen, P., Turmunkh, T., Avirmed, D., Khurelbaatar, T., & Ochirjav, T. (2022). Soil properties of the permafrost zone and differences among regions of Mongolia. *Mongolian Journal of Geography and Geoecology*, 65–73. <https://doi.org/10.5564/mjgg.v59i43.2513>
35. Wan, Z., Hook, S., & Hulley, G. (2021). MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V061 [Data set]. In *NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center*. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.061>
36. U.S. Geological Survey. (2015). *Landsat surface reflectance-derived spectral indices*. U.S. Department of the Interior. Retrieved from <https://www.usgs.gov> WorldClim 2.1: Current Conditions (1970-2000). (n.d.). Retrieved from <https://www.worldclim.org>
37. Yamkhin, J., Yadamsuren, G., Khurelbaatar, T., Gansukh, T. E., Tsogtbaatar, U., Adiya, S., ... & Natsagdorj, S. (2022). Spatial distribution mapping of permafrost in Mongolia using TTOP. *Permafrost and Periglacial Processes*, 33(4), 386-405. <https://doi.org/10.1002/ppp.2165>