

ГЕОЭКОЛОГИЙН  
НӨХЦӨЛИЙГ ҮНЭЛЭХ  
АРГА ЗҮЙН ГАРЫН  
АВЛАГА

УЛААНБААТАР ХОТ  
2026 ОН

Энэхүү гарын авлагыг “Геоэкологийн нөхцөлийг тодорхойлох, үнэлэх арга зүй боловсруулах” сэдэвт суурь судалгааны төслийн хүрээнд боловсруулав.

Гарын авлага боловсруулсан: Д. Сайнбаяр

Н.Болдбаатар

Д.Амарсайхан

Ж.Өнөрням

Э.Жаргалдалай

Б.Бямбадолгор

## **ГАРЧИГ**

ОРШИЛ .....	3
I. ГЕОЭКОЛОГИЙН НӨХЦӨЛИЙГ ҮНЭЛЭХЭД АШИГЛАХ СЭДЭВЧИЛСЭН ДАВХАРГЫГ ҮҮСГЭХ.....	4
II. ҮНЭЛГЭЭНД АШИГЛАГДАХ ХУВЬСАГЧДЫГ НЭГ СТАНДАРТАД ОРУУЛАХ, НОРМЧЛОХ .....	24
III. ЭНТРОПИ ЖИНГ ТОДОРХОЙЛОХ .....	28
IV. TOPSIS ШИЙДВЭР ГАРГАЛТЫН АРГААР ГЕОЭКОЛОГИЙН НӨХЦӨЛИЙН ИНДЕКСИЙГ ТООЦОХ .....	30
V. МЭДРЭМЖИЙН ШИНЖИЛГЭЭ.....	34
АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ.....	35

## **ОРШИЛ**

Сүүлийн жилүүдэд даян дэлхийн дулаарал, байгаль орчны доройтол, цөлжилт, байгалийн нөөцийн хомсдол зэрэг асуудлууд улам бүр хурцдаж, тогтвортой хөгжлийн зорилтуудыг хэрэгжүүлэх шаардлага эрс нэмэгдэж байна. Үүнтэй холбоотойгоор геоэкологийн судалгаа нь байгаль-нийгмийн харилцан үйлчлэлийг иж бүрнээр нь үнэлэх, орчны өөрчлөлтийг тодорхойлох, улмаар оновчтой менежмент, бодлого боловсруулахад чухал ач холбогдолтой болж байна.

Геоэкологи нь газарзүй, экологи, хүрээлэн буй орчин, геологи, зайнаас тандан судлал, уур амьсгал судлал зэрэг олон салбарын огтлолцолд орших тул түүний судалгаанд орон зайн мэдээлэлд суурилсан зураглалын асуудал онцгой байр суурь эзэлдэг. Геоэкологийн зураглал нь тухайн газар нутгийн байгаль орчны төлөв байдал, өөрчлөлт, эрсдэл, нөлөөллийн тархцыг илэрхийлэх, үнэлэх, харьцуулах, төлөвлөлтөд ашиглах суурь хэрэгсэл болдог.

Энэхүү гарын авлагад ШУА-ийн Газарзүй, геоэкологийн хүрээлэнгийн Агаар, сансрын зайнаас тандан судлалын салбарт хэрэгжүүлсэн *“Геоэкологийн нөхцөлийг тодорхойлох, үнэлэх арга зүй боловсруулах (2022–2024)”* суурь судалгааны төслийн хүрээнд боловсруулсан геоэкологийн нөхцөлийг хэрхэн зураглах арга зүйн талаар системтэйгээр тайлбарласан болно.

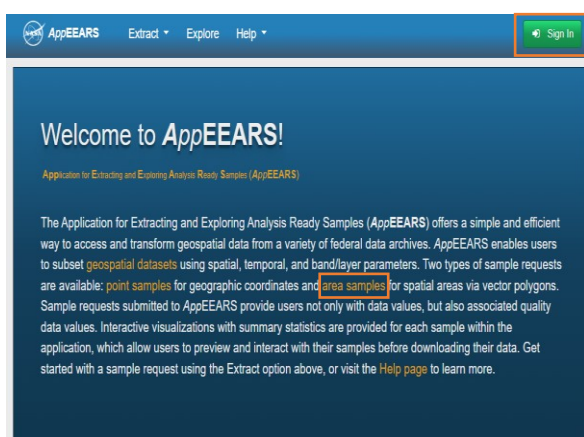
Зураглалд Эрдэнэт орчмын нутгийг загвар талбай болгон сонгосон бөгөөд геоэкологийн нөхцөлийг үнэлэхийн тулд 20 хувьсагч (сэдэвчилсэн давхарга) ашиглав. Геоэкологийн нөхцөлийн тооцоололд Python 3.13 программчлалын хэл болон R 2024.12.0, QGIS3.44, ArcMAP10.8 программ хангамжуудыг ашиглан гүйцэтгэсэн.

## I. Геоэкологийн нөхцөлийг үнэлэхэд ашиглах сэдэвчилсэн давхаргыг үүсгэх

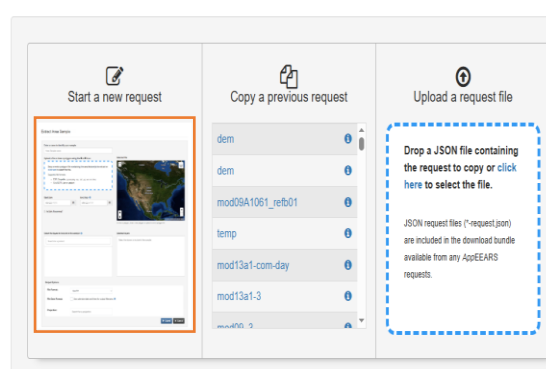
Эрдэнэт орчмын судалгааны талбайн геоэкологийн нөхцөлийг үнэлэхийн тулд 20 сэдэвчилсэн давхаргыг ашигласан. Эдгээр сэдэвчилсэн давхаргууд нь өөр өөр зорилгын хүрээнд янз бүрийн боловсруулалтын арга зүй, математик илэрхийллүүдээр тооцоолон урьдчилан бэлтгэсэн анхдагч өгөгдлүүд юм. Өгөгдлүүдийг үнэлгээнд ашиглахад бэлэн болгохын тулд тус бүр дараах алхмуудыг хийж гүйцэтгэсэн.


**Өндрийн тоон загвар (DEM).** Өндрийн тоон загвар (DEM) нь тухайн газар нутгийн өндөршлийн утгыг ашиглан 3-хэмжээст орон зайд дүрс байгуулах загвар юм. Өгөгдлийг АНУ-ын Үндэсний Агаарын Сансрын Захиргаа (NASA)-ны Дэлхий судлалын өгөгдлийн сангийн <https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/> сайтад бүртгүүлэн үнэгүй татаж авах боломжтой.

1. Дээр дурдсан сайтад бүртгэл үүсгэсний дараа Зурагт дүрслэн үзүүлдсний дагуу **Sign in** дарж нэвтрэн орж **Area samples** → **Extract Area Sample** сонгоно. Ингэснээр сонгосон талбайгаар өгөгдөл татагдах болно. Сонгосны дараа доорх дарааллыг дэс дараалан гүйцэтгэнэ.



Extract Area Sample



2. **Enter a name to identify your sample** талбарт татах файлын нэрийг бичиж татах хүрээг тэмдэглэгээг  сонгон зурна.
3. **Start Date** болон **End Date** хэсэгт өгөгдлийн хамрах хугацааг тохируулна.

4. **Select the layers to include in sample** -д өгөгдөл хайх түлхүүр үгийг бичнэ. Энд өгөгдлийн сангаас гарч ирсэн жагсаалтаас SRTMGL3\_DEM (SRTMGL3\_NC.003) сонгож өгнө. Тус өгөгдлийн орон зайн шийд нь 90 метр.
5. Output Options → **File Format** талбарт GeoTiff -ийг тохируулж өгснөөр өгөгдөл нь WGS84 проекцоор татагдах болно.
4. Эцэст **Submit** товчийг дарснаар бүртгүүлсэн e-mail хаягт татах линк ирнэ. Татах линкээр орсноор судалгааны талбайн DEM өгөгдлийг татан авч боловсруулсан.

The screenshot displays the AppEEARS web interface for configuring a sample. The interface is divided into several sections:

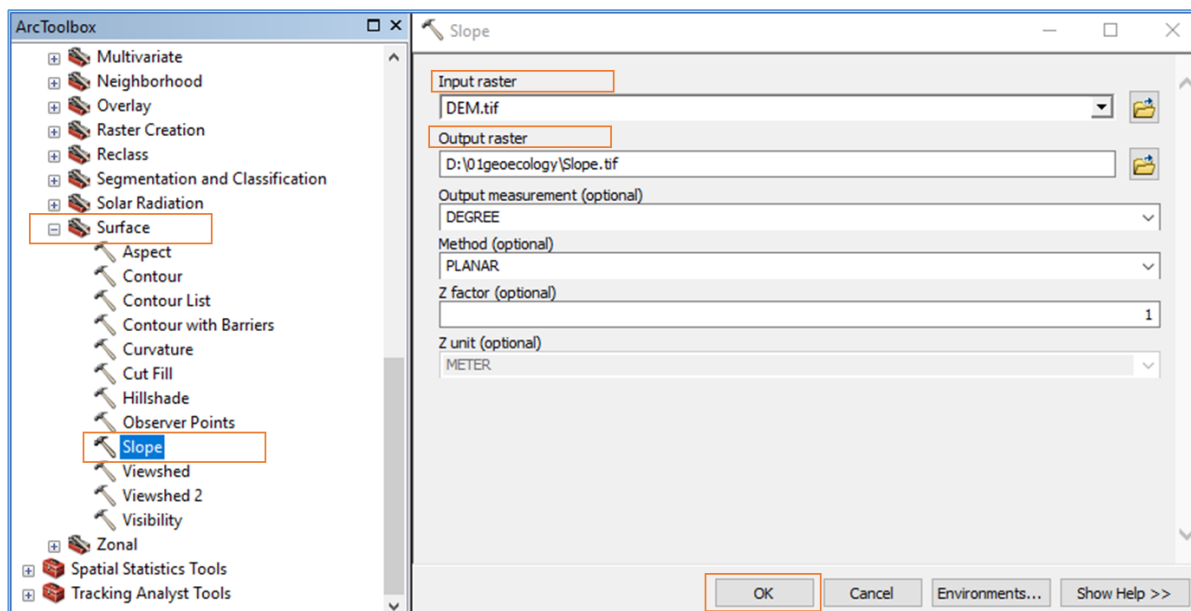
- Enter a name to identify your sample:** A text input field containing the name "dem".
- Upload a file or draw a polygon using the [icon] or [icon] icon:** A dashed blue box containing instructions: "Drop a vector polygon file containing the area feature(s) to extract or [click here](#) to select the file." Below this, supported file formats are listed: Shapefile (.zip including .shp, .dbf, .prj, and .shx files) and GeoJSON (.json or .geojson).
- Selected file (User-Drawn-Polygon):** A map view showing a green polygon drawn over a terrain image. The map includes a scale bar, a coordinate display (Lat: 48.605 Lon: 104.356), and a legend.
- Start Date / End Date:** Two date pickers showing "01-01-2002" and "12-31-2002".
- Is Date Recurring?:** A checkbox that is currently unchecked.
- Select the layers to include in the sample:** A text input field containing "DEM".
- Selected layers:** A list box showing "SRTMGL3\_DEM 90m, Static".
- Output Options:**
  - File Format:** A dropdown menu set to "GeoTiff".
  - Filename Date Format:** A checkbox for "Use calendar date and time for output filenames" which is unchecked.
  - Projection:** A dropdown menu set to "Geographic". A tooltip shows the projection details: Datum: WGS84, EPSG: 4326, PROJ: +proj=longlat +datum=WGS84, 4: +no\_defs=True.
  - NOTE:** A warning box states: "Be aware that any reprojection of data from its source projection to a different projection will inherently change the data from its original format. All reprojections use GDAL's gdalwarp function in combination with the PROJ string listed above. For additional information, see the AppEEARS help documentation."
- Submit / Cancel:** Two buttons at the bottom right, with "Submit" highlighted by an orange box.

**Гадаргын налуу (Slope).** Өмнө нь татаж авсан өндрийн тоон загвар (DEM)-аар Slope-ийг тооцоолно. Slope нь газрын гадаргын хэвтээ чиглэлд ногдох өндөршлийн өөрчлөлтийг илэрхийлэх геоморфологийн үзүүлэлт юм. Налууг ихэвчлэн градус (°) эсвэл хувь (%)-аар илэрхийлдэг бөгөөд тухайн гадаргын усны урсац, хөрсний элэгдэл, хөрсний чийгийн тархалт, улмаар ургамалжилт болон экосистемийн бүтцэд чухал нөлөө үзүүлдэг.



*ArcGIS 10.8 программын ArcToolbox-ийн Spatial Analyst Tools нь гридийн олонлогоос бүрдэх растер бүтэцтэй өгөгдлүүд дээр ажиллах боломжийг олгодог цэсүүдийг багтаасан үндсэн хэрэгсэл юм.*

1. ArcGIS 10.8 программын **ArcToolbox** -ийн **Spatial analyst tools** → **Surface** → **Slope** цэсийг сонгон нээнэ.
2. **Input raster** талбарт судалгааны талбайн DEM оруулна.
3. **Output raster** -т гадаргын налууг тооцоолж гарах зургийн нэрийг зааж өгнө.
4. ОК товчийг дарснаар Гадаргын налуу (Slope)-ийн сэдэвчилсэн давхарга үүсэх болно.

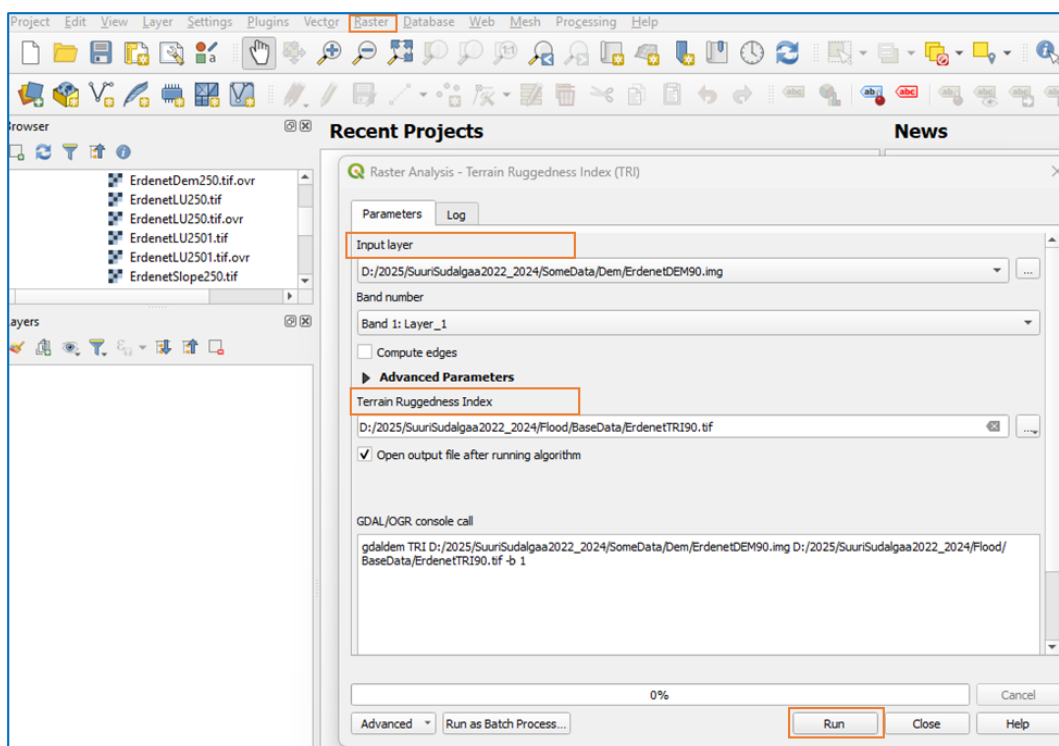


**Гадаргын бартаат байдлын индекс (TRI).** Газрын гадаргын бартаат байдлын индекс (TRI)-ийг тооцоолохдоо өмнө татаж авсан өндрийн тоон загварын өгөгдлийг ашигладаг. Тус индекс нь газрын гадаргын бартаат, тэгш бус байдлын түвшнийг илэрхийлэх тоон үзүүлэлт бөгөөд тухайн цэгийн гадаргаас дээших өндрийг түүний ойролцоох (ихэвчлэн 8 хөрш) пикселүүдийн өндөртэй харьцуулан тооцдог.



*QGIS3.44.2 программын Raster → Analysis нь гридийн олонлогоос бүрдэх растер бүтэцтэй өгөгдлүүд дээр ажиллах боломжийг олгодог төдийгүй энд газрын гадаргын хотгор гүдгэр, гадаргын бүтцийг тодорхойлох цэсүүд багтсан байдаг.*

1. QGIS 3.44.2 программын **Raster** → **Analysis** цэсээс **Terrain Ruggedness (TRI)**-ийг нээхэд Зурагт үзүүлсэн цонх нээгдэнэ.
2. **Input layer**-д оролтын DEM-ийг сонгоно.
3. **Terrain Ruggedness Index** талбарт тооцоолж гарах Terrain Ruggedness (TRI)-ийн нэр, замыг зааж өгнө.
4. **Run** товчийг дарж ажиллуулснаар TRI-ийн растер өгөгдөл бэлэн болно. Энд оролтын өгөгдөл буюу DEM-ийн орон зайн шийдтэй адил байна.

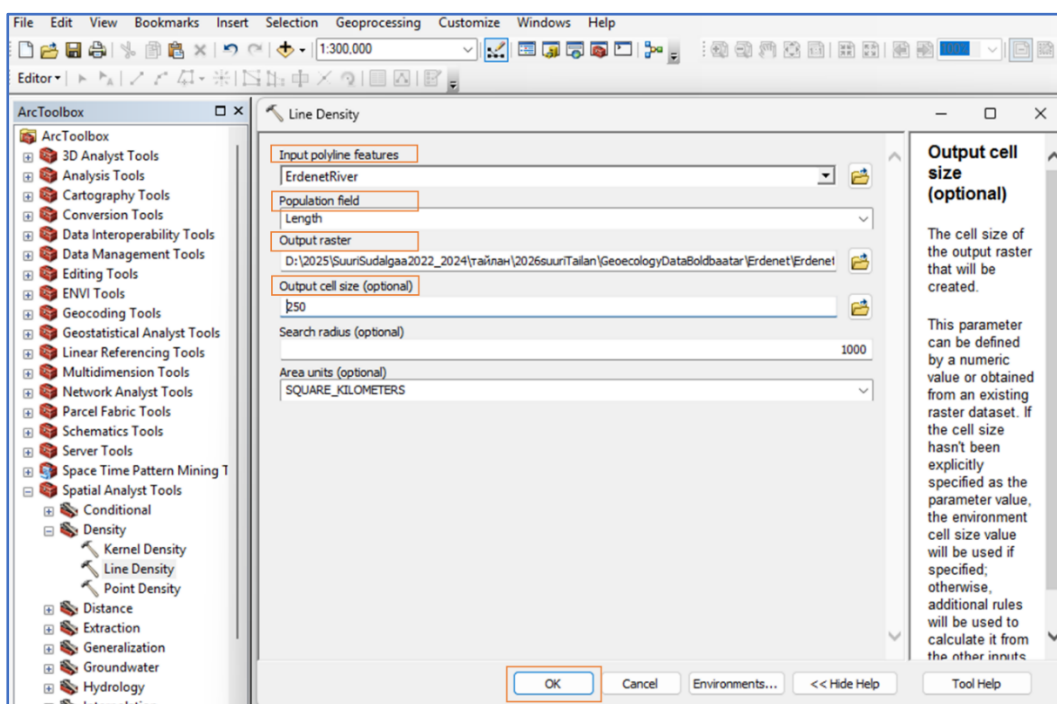


**Гадаргын урсцын сүлжээний нягтшил (DRD).** Гадаргын урсцын сүлжээний нягтшил (DRD) нь тухайн сав газар эсвэл судалгааны талбай дахь гол, горхи, гадаргын урсцын сүлжээний нягтралыг илэрхийлдэг морфометрийн үзүүлэлт юм. Гадаргын урсцын сүлжээний нягтшил (DRD)-ийн сэдэвчилсэн давхаргыг гаргахдаа ArcGIS 10.8 программын ArcToolbox-ийн Spatial analyst tools-д байх хэрэгслийг дараах дарааллын дагуу ашиглана гаргасан.



*ArcGIS 10.8 программын ArcToolbox → Spatial Analyst Tools-ийн Density нь цэг, шугаман хэлбэрээр илэрхийлэгдэх вектор өгөгдлийн утгын тархалт, нягтралыг орон зайн грид бүтэцтэй растер хэлбэрээр илэрхийлэх боломжийг олгодог.*

1. ArcGIS 10.8 программын **ArcToolbox** -ийн **Spatial analyst tools** → **Density** → **Line Density** цэсийг нээнэ.
2. **Input polyline features**-т судалгааны талбайд хамрах гол, горхины шугаман вектор өгөгдлийг оруулна.
3. **Population field**-т гол, горхины шугаман вектор өгөгдлийн атрибут мэдээллээс уртын мэдээллийг агуулсан баганыг зааж өгнө.
4. **Output raster**-т DRD -сэдэвчилсэн давхаргын замыг зааж, хадгалах нэрийг бичнэ. **Output cell size**-д гаралтын растер өгөгдлийн орон зайн шийдийг тохируулж, ОК товчийг дарна.

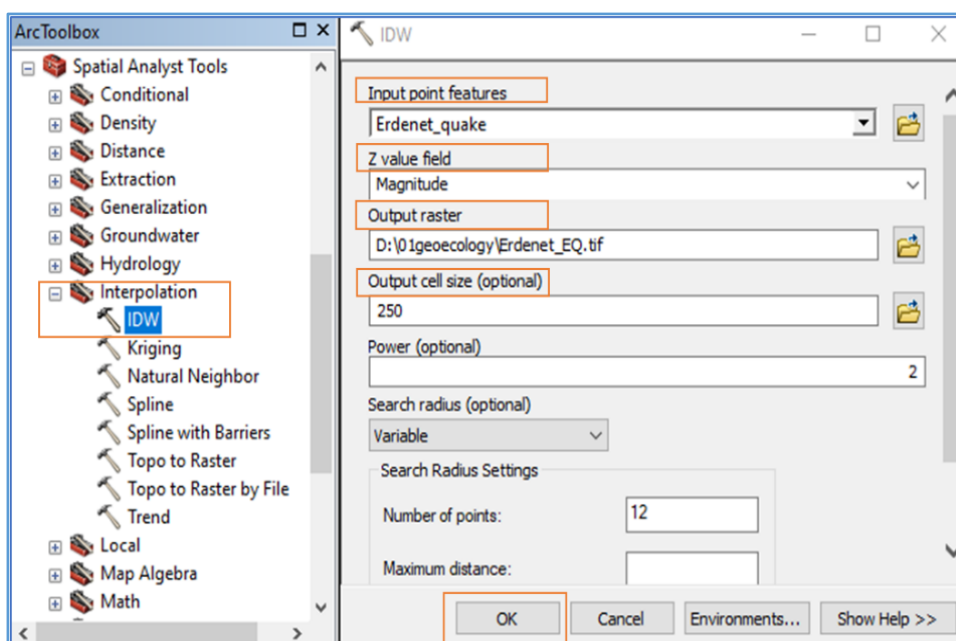


**Газар хөдлөлт (EQ).** Газар хөдлөлт нь үндсэндээ геологийн гаралтай үзэгдэл боловч экосистемд шууд болон шууд бус нөлөө үзүүлдэг хүчин зүйл юм. Тус өгөгдлийг боловсруулахдаа АНУ-ын Геологийн судалгааны төв (United States Geological Survey)-ийн <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> сайтаас 2000–2024 оны хоорондох газар хөдлөлтийн 6 цэгэн өгөгдлийг, нэмэлтээр 1963-2024 оны хоорондох газар хөдлөлтийн нийт 32 цэгийн өгөгдлийг оруулсан. Эдгээр цэгээр илэрхийлэгдэх вектор өгөгдлийг нэгтгэн доорх дарааллын дагуу боловсруулж сэдэвчилсэн давхаргыг гаргаж авсан.




*ArcGIS 10.8 программын ArcToolbox → Spatial Analyst Tools-ийн Interpolation нь оролтын цэгэн вектор өгөгдлийн тухайлсан утгад тулгуурлан интерполяцийн янз бүрийн геостатистик аргаар орон зайг хамарсан растер өгөгдлийг гаргаж авдаг үндсэн техник юм.*

1. ArcGIS 10.8 программын **ArcToolbox** → **Spatial analyst tools** → **Interpolation** → **IDW** цэсийг нээнэ.
2. **Input point features**-т газар хөдлөлтийн мэдээллийг агуулсан цэгээр илэрхийлэгдэх вектор өгөгдлийг оруулна.
3. **Z value field**-д өгөгдлийн атрибут мэдээллээс газар хөдлөлтийн утгын мэдээллэл бүхий баганыг зааж өгнө.
4. **Output raster**-д EQ -сэдэвчилсэн давхаргын замыг зааж, хадгалах нэрийг бичнэ. **Output cell size**-д гаралтын растер өгөгдлийн орон зайн шийдийг тохируулж, ОК товчийг дарна.

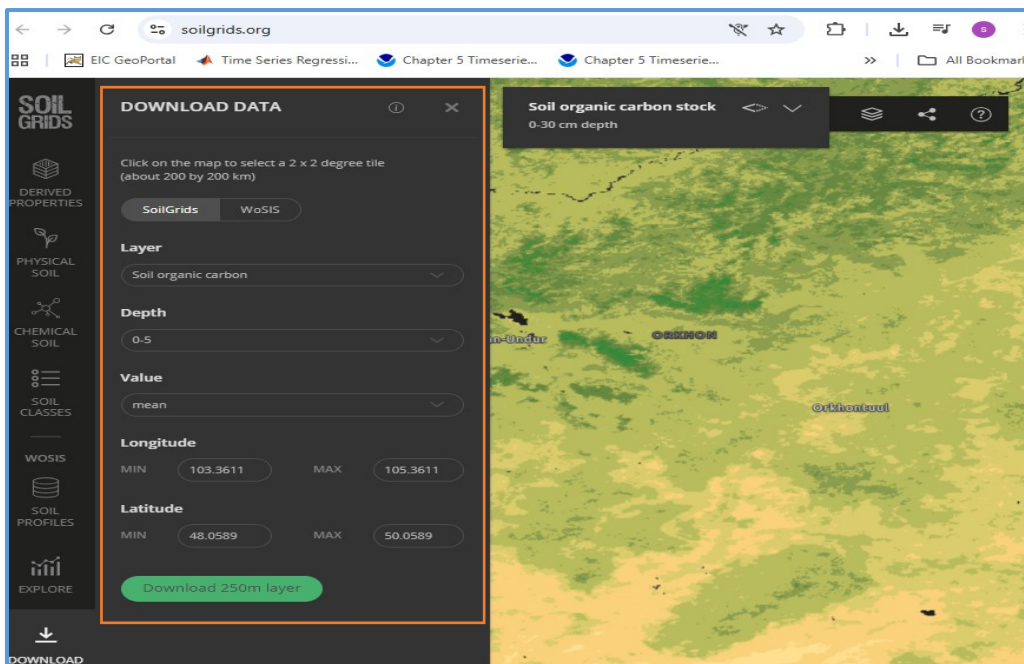


**Хамгийн дулаан сарын хамгийн их температур (Warmest) болон хур тунадас (P).** АНУ-ын Геологийн судалгааны төв (United States Geological Survey)-өөс гаргадаг био-уур амьсгалын үзүүлэлтүүдээс хамгийн дулаан сарын хамгийн их температур (BIO5) болон нийлбэр хур тунадас (BIO12)-ны бүтээгдэхүүнийг <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html> сайтад орж зурагт үзүүлсэн холбоос дээр даран татан авч, "zip" файлыг задлан судалгааны талбайгаар боловсруулна. Энд тус өгөгдөл нь 1 км-ийн орон зайн нарийвчлалтай 1970–2000 оны хоорондох 30 жилийн дундаж өгөгдөл юм.



variable	10 minutes	5 minutes	2.5 minutes	30 seconds
Bioclimatic variables	<a href="#">bio 10m</a>	<a href="#">bio 5m</a>	<a href="#">bio 2.5m</a>	<a href="#">bio 30s</a>

**Хөрсний органик карбон (SOC).** SOC өгөгдлийг Дэлхийн хөрсний мэдээллийн сангийн <https://soilgrids.org/> сайтаас 250 м-ийн орон зайн шийдтэйгээр зурагт үзүүлсэн байдлаар тохируулж, татан авч боловсруулсан (Rodrigo et al., 2021). SOC нь хөрсний үржил шим, бүтэц, ус нэвчүүлэх чадавх, катион солилцоо, шим тэжээлийн бодисын эргэлт, бичил организмуудын үйл ажиллагаа, ургацад нөлөөлдөг бөгөөд хүрээлэн буй орчны чанарын чухал индикаторт тооцогддог (Khavtgai et al., 2022, 2023).

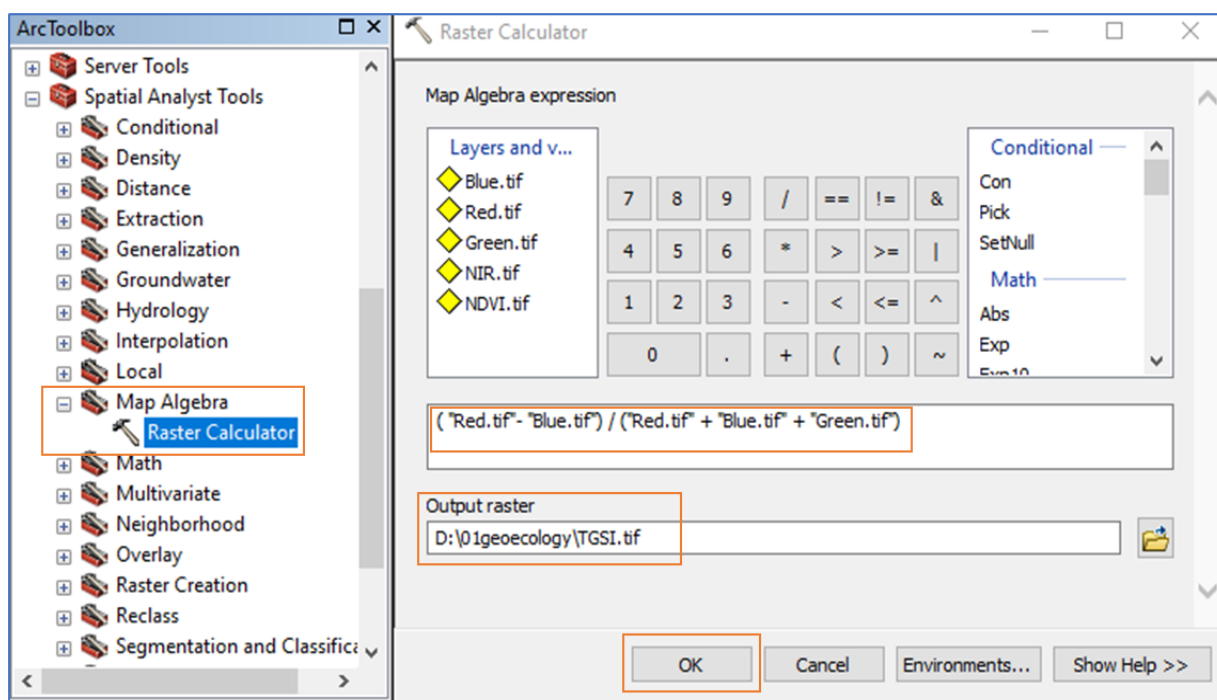


**Хөрсний ширхгийн бүрэлдэхүүний индекс (TGSI).** Topsoil Grain Size Index (TGSI) нь өнгөн хөрсний ширхгийн хэмжээ механик бүрэлдэхүүнийг (coarsening) гадаргын спектр ойлтын физик шинж чанарт тулгуурлан тооцоолдог (Xiao et al., 2006). TGSI-ийн их утга нь элсэн ширхэг ихтэй, харин бага буюу сөрөг утга нь ургамал бүрхэц, ус гэх мэт гадаргын нөхцөлийг илтгэнэ. Тус сэдэвчилсэн давхаргыг Sentinel 2 хиймэл дагуулын 2020–2024 оны 3–5 сарын өгөгдлийг <https://www.sentinel-hub.com/> сайтаас татан авч, дараах томъёогоор тооцоолсон:

$$TGSI = \frac{Red-Blue}{Red+Blue+Green}$$

Энд *Red*, *Blue*, *Green* – харгалзан үзэгдэх гэрлийн улаан, хөх, ногоон туяаны мужид хэмжсэн ойлтын утгыг илэрхийлнэ.

1. Доор зурагт дүрсэлснээр ArcGIS 10.8 программын **ArcToolbox** → **Spatial analyst tools** → **Map Algebra** → **Raster Calculator** цэсийг сонгон нээнэ.
2. Томъёо бичих талбарт Sentinel 2 хиймэл дагуулын татаж авч урьдчилан боловсруулалт хийсэн 2, 3 болон 4-р сувагт харгалзах Blue, Green, Red өгөгдлийг ашиглан TGSI-ийг тооцох томъёог бичнэ.
3. **Output raster**-д судалгааны талбайн хэмжээнд TGSI-ийг тооцон гарах орон зайн тархалтын зургийн нэрийг өгч, хадгалах замыг заан ОК товчийг дарна.

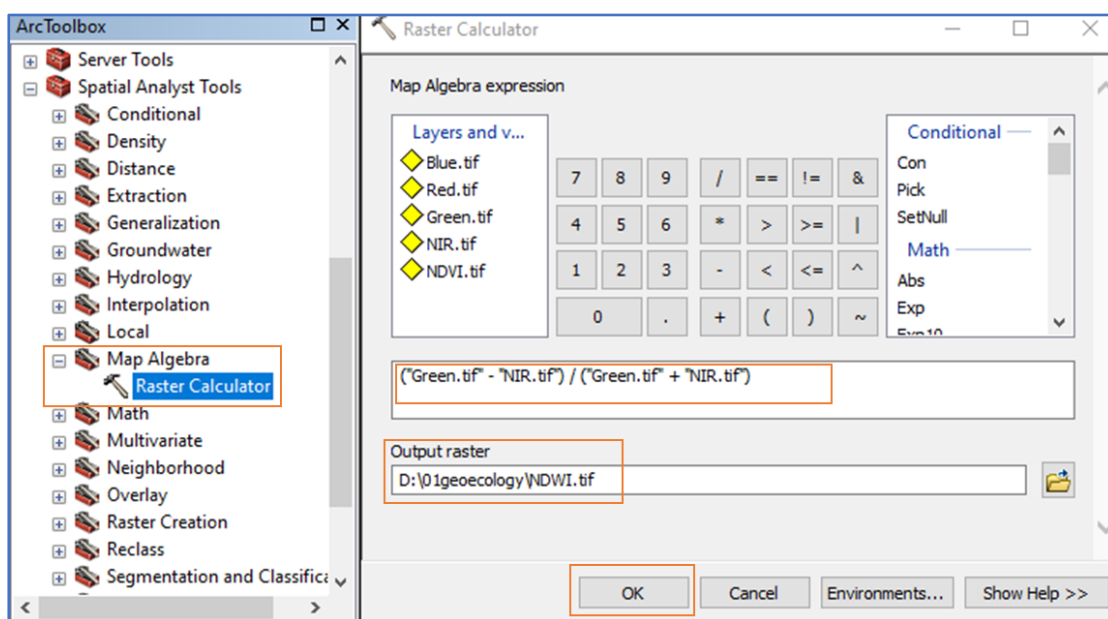


**Усны нормчлогдсон ялгаврын индекс (NDWI).** Тус индекс нь усны үзэгдэх гэрлийн ногоон туяаны мужид өндөр ойлт (Green), ойрын нэл улаан туяаны мужид бага ойлт (Near Infrared, NIR)-ыг өгдөг физик шинж чанарт тулгуурласан бөгөөд энэ нь бусад газрын бүрхэвчийн шинж чанараас ялгарах үндэслэл болдог (McFEETERS, 1996). Индексийн утга нь -1-ээс +1 хооронд хэлбэлзэх бөгөөд эерэг утгууд нь ус болон чийглэг орчныг, сөрөг утгууд нь хуурай газар болон ургамалжилттай бүс нутгийг илэрхийлдэг. NDWI-ийг Landsat 8, 9 хиймэл дагуулын 2020–2024 оны 6–аас 8 сарын өгөгдлийг <https://earthexplorer.usgs.gov/> сайтаас татан авч, судалгааны талбайн хүрээнд дараах томъёогоор тооцоолно:

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)} \quad (3)$$

Энд *Green, NIR* - харгалзан үзэгдэх гэрлийн ногоон мужид, ойрын нэл улаан туяаны мужид хэмжсэн ойлтын утга.

1. ArcGIS 10.8 программын **ArcToolbox** → **Spatial analyst tools** → **Map Algebra** → **Raster Calculator** зурагт харуулсны дагуу цэсийг сонгон нээнэ.
2. Томъёо бичих талбарт Landsat 8, 9 хиймэл дагуулын урьдчилан боловсруулалт хийсэн 3 болон 5-р сувагт харгалзах Green, NIR өгөгдлийг ашиглан NDWI-ийг тооцох томъёог бичиж өгнө.
3. **Output raster**-д судалгааны талбайн NDWI-ийг тооцон гарах орон зайн тархалтын зургийн нэрийг өгч, хадгалах замыг заан ОК товчийг дарна.



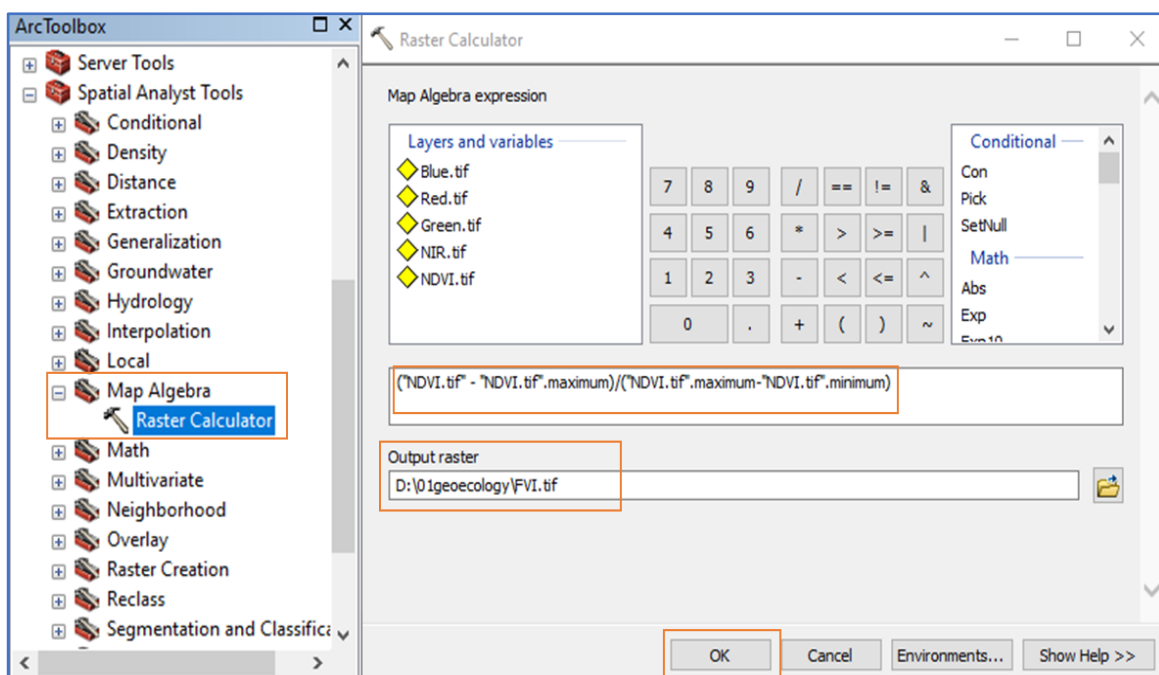
**Ургамлын фракцын индекс (FVI).** FVI-ийг MODIS хиймэл дагуулын MOD13Q1 бүтээгдэхүүний 2000-2022 оны NDVI-өгөгдлийг ашиглан (4) томъёогоор тооцоолно:

$$FVI = \frac{(NDVI - NDVI_{max})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})}$$

Энд  $NDVI$  – ургамлын нормчлогдсон ялгаврын индекс,  $NDVI_{max}$ ,  $NDVI_{min}$  – харгалзан NDVI-ийн хамгийн их, бага утга.

Судалгаандаа FVI индексийг 2000-2022 оны он тус бүр дээр дулааны улирлын сар бүр дээр бодож, тэдгээрийн дундаж утгыг авсан. FVI индексийн бага утга нь халцгай, тачир сийрэг ургамалтай газрыг илэрхийлдэг бол их утга нь ургамал бүрхэц сайтай газрыг илэрхийлнэ (Jiang et al., 2006).

1. ArcGIS 10.8 программын **ArcToolbox** → **Spatial analyst tools** → **Map Algebra** → **Raster Calculator** цэсийг сонгон нээнэ.
2. Томъёо бичих талбарт MOD13Q1 NDVI татаж авч урьдчилан боловсруулалт хийсэн өгөгдлийг ашиглан FVI-ийг тооцох томъёог зурагт харуулсан байдлаар бичиж өгнө.
3. **Output raster**-д судалгааны талбайн FVI-ийг тооцон гарах орон зайн тархалтын зургийн нэрийг өгч, хадгалах замыг зааж ОК товчийг дарна.



**Мезенцевийн чийгшлийн итгэлцүүл (MI).** MI-ийг тооцохын тулд Станцын хэмжилтийн мэдээ болон хиймэл дагуулын мэдээг нэгтгэн загварчилсан CHIRPS өгөгдлийн сангийн <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS/v3.0/> сайтаас 2000-2022 оны жилийн нийлбэр хур тунадасны өгөгдөл, түүнчлэн Европын дунд хугацааны прогнозын төвийн 'ERA-5 Land' реанализийн өгөгдлийн сангийн <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets> сайтаас 2000-2022 оны хоногийн дундаж агаарын температурын өгөгдлийг татан авч ашигласан. Эдгээр өгөгдлийн орон зайн шийд ялгаатай байсан учир урьдчилан боловсруулалт хийж адил орон зайн шийдтэй болгосон. MI-ийн бага утга нь чийгшлийн хувьд чийг дутмаг хуурай бүс нутгийг, их утга нь чийглэг бүс нутгийг илтгэдэг (Нацагдорж болон бусад., 2024).

Мезенцевийн чийгшлийн итгэлцүүрийг дараах томъёогоор тооцоолно:

$$MI = \frac{P}{(0.2 \sum T_{>10^0} + 306)}$$

Энд  $P$  – жилийн нийлбэр хур тунадас (мм),  $\sum T_{>10^0}$  –  $+10^{\circ}\text{C}$  дээш температуртай хоногийн дундаж температурын нийлбэр ( $^{\circ}\text{C}$ ).

R программ дээр шаардлагатай сангуудыг ашиглан тооцох кодыг доорх зурагт үзүүлсний дагуу бичиж, MI-ийн сэдэвчилсэн давхаргыг гаргаж авсан.

```
# =====
# Мезенцевийн чийгшлийн итгэлцүүл (MI) тооцох нь
# Томъёо: MI = P / (0.2 * sum(T>10°C) + 306)
# =====
# --- Шаардлагатай сан -----
library(terra)
# =====
# 1. MI индекс тооцоход ашиглах растер өгөгдлийн оруулах
# =====
# Оролтын өгөгдөл 1 = Жилийн нийлбэр хур тунадас
precipitation <- rast("D:/01geoecology/CHIRPS/erdenet_annual_precipitation.tif")
# Оролтын өгөгдөл 2 = Жилийн 10 градус цельсээс дээш температурын нийлбэр
temperature <- rast("D:/01geoecology/Temperature/erdenet_annual_temperature_above10C.tif")
# Үр дүнгийн гаралтын өгөгдлийн хадгалах хавтас (folder)
output_folder <- "D:/01geoecology/output"
# =====
# 2. Мезенцевийн чийгшлийн итгэлцүүл (MI)-ийг тооцох
# Томъёо: MI = P / (0.2 * sum(T>10) + 306)
# =====
MI_index <- precipitation / (0.2 * temperature + 306)
# =====
# 3. Үр дүнг хадгалах
# =====
writeRaster(MI_index,
            file.path(output_folder, "erdenet_MI_index.tif"),
            overwrite = TRUE)
```

**Уур амьсгалын биологийн үр ашгийн индекс (ТК).** ТК -ийг дээр тооцсон Мезенцевийн чийгшлийн итгэлцүүрийг ашиглан дараах байдлаар тодорхойлдог:

$$TK = \sum T_{>10} * MI$$

Энд  $T_{>10}$  -  $+10^{\circ}\text{C}$  дээш температуртай хоногийн дундаж температурын нийлбэрийг 100 дахин багасгасан утга,  $MI$  –Мезенцевийн чийгшлийн итгэлцүүр.

Тус индексийн их утга нь чийг-дулааны зохист харьцаа бүрдсэн, ургамлын анхдагч цэвэр бүтээмж өндөртэй, байгалийн болон антропоген хүчин зүйлийн нөлөөлөлд илүү тогтвортой байх газар нутгийг илтгэн харуулдаг (Нацагдорж болон бусад., 2024).

Судалгаандаа 2000-2022 оны хугацааны он тус бүр дээр тооцон, дундаж утгаар нь авсан. MI-ийн сэдэвчилсэн давхаргыг R программ дээр зурагт үзүүлсэн байдлаар код бичин гүйцэтгэсэн.

```
# =====
# Уур амьсгалын биологийн үр ашгийн индекс (ТК) тооцох нь
# Томьёо: TK = sum(T>10°C) * MI
# =====
# --- Шаардлагатай сан -----
library(terra)
# =====
# 1. MI индекс тооцоход ашиглах растер өгөгдлийн оруулах
# =====
# Оролтын өгөгдөл 1 = Мезенцевийн чийгшлийн итгэлцүүл
MI <- rast("D:/01geoecology/MI_index/erdenet_MI_index.tif")
# Оролтын өгөгдөл 2 = Жилийн 10 градус цельсээс дээш температурын нийлбэр
temperature <- rast("D:/01geoecology/Temperature/erdenet_annual_temperature_above10C.tif")
# Үр дүнгийн гаралтын өгөгдлийн хадгалах хавтас (folder)
output_folder <- "D:/01geoecology/output"
# =====
# 2. Уур амьсгалын биологийн үр ашгийн индекс (ТК) тооцох
# Томьёо: TK = sum(T>10°C) * MI
# =====
temperature <- temperature / 100 # идэвхтэй температурын нийлбэрийг 100 дахин багасгах
TK_index <- temperature * MI
# =====
# 3. Үр дүнг хадгалах
# =====
writeRaster(TK_index,
            file.path(output_folder, "erdenet_TK_index.tif"),
            overwrite = TRUE)
```

**Ургамлын нормчилогдсон ялгаврын индексийн өөрчлөлт ( $\Delta NDVI$ ).**

MODIS хиймэл дагуулын MOD13Q1 бүтээгдэхүүний 2000-2022 оны NDVI-өгөгдлийг ашиглан Сений налуугийн аргаар тооцсон. Тооцоог R программ дээр доор зурагт үзүүлсэн байдлаар код бичин гүйцэтгэсэн болно. Энд код нь 1) Растер өгөгдлийг оруулах, 2) Өгөгдлийг шалгах, 3) Оролтын өгөгдлүүдийг нэгтгэн матриц үүсгэх, хугацааны векторыг тодорхойлох, 4) Сений налуугийн аргаар өөрчлөлтийг тооцох алгоритм, 5) Тооцооллын үр

дүнгийн статистикийг харах, 6) Үр дүнг хадгалах гэсэн 6 үндсэн хэсгээс бүрдэж байна.

```
# =====
# Сений налуугийн аргаар Ургамлын нормчилгдсон ялгаврын
# индексийн өөрчлөлт (ΔNDVI)-ийг тооцох нь
# =====
# --- Шаардлагатай сан -----
library(terra)
library(trend)
library(sf)
# =====
# 1. Сений налуугийн аргаар ΔNDVI тооцоход ашиглах растер өгөгдлийн оруулах
# =====
# Оролтын өгөгдөл = MODIS NDVI-ийн хугацааны цуваа өгөгдөл
# Оролтын растер өгөгдлийг хадгалж буй хавтас
ndvi_folder <- "D:/01geoeecology/MODIS_NDVI"
# Үр дүнгийн гаралтын өгөгдлийг хадгалах хавтас
output_dir <- "D:/01geoeecology/outputs"
# =====
# 2. Оролтын өгөгдлийн хавтаст хадгалагдаж буй бүх .tif, .tiff өргөтгөлтэй файлуудыг шалгах
# =====
raster_files <- list.files(
  path      = ndvi_folder,
  pattern   = "\\.[Tt][Ii][Ff]$",
  full.names = TRUE,
  recursive = FALSE )
# NDVI_2000.tif, MOD13_2001.tif гэх мэт нэр оноон хадгалсан растер файлын нэрнээс зөвхөн оны
# мэдээллийг ялган авч хугацааны цуваа үүсгэх
dates <- as.numeric(gsub("\\D", "", basename(raster_files)))
raster_files <- raster_files[order(dates)]
# =====
# 3. Оролтын растер өгөгдлүүдийг нэгтгэж матриц үүсгэх, хугацааны векторыг тодорхойлох
# =====
raster_stack <- rast(raster_files)
names(raster_stack) <- paste0("Y", sort(dates))
message("Raster stack ready: ", nlyr(raster_stack), " layers.")
print(raster_stack)
time_vector <- seq_len(nlyr(raster_stack))
# =====
# =====
# 4. Сений налуугийн аргаар өөрчлөлтийг тооцох алгоритм
# =====
# Оролтын өгөгдлийн тухайн пикселийн хугацааны цуваанд 3 хүртлэх NULL
# утга байгаа бол тухайн пикселийг тооцооноос хасгах
sens_trend <- function(values) {
  if (sum(is.na(values)) > 3) {
    return(c(sens_slope = NA_real_)) }
  valid_idx <- !is.na(values)
  values_clean <- values[valid_idx]
  time_clean <- time_vector[valid_idx]
  ts_clean <- ts(values_clean,
    start = time_clean[1],
    frequency = 1)
  sen <- tryCatch(
    sens.slope(ts_clean),
    error = function(e) NULL )
  if (is.null(sen)) {
    return(c(sens_slope = NA_real_, sens_pvalue = NA_real_)) }
  c(sens_slope = as.numeric(sen$estimates)) }
# =====
# 5. Пиксел тус бүрийн утгад гарч буй өөрчлөлтийг Сений налуугийн аргаар тооцох
# =====
result_raster <- app(raster_stack, fun = sens_trend)
names(result_raster) <- c("sens_slope")
# Тооцооллын үр дүнгийн статистикийг Console дээр харуулах
print(result_raster)
# =====
# 6. Үр дүнг хадгалах
# =====
writeRaster(
  result_raster[["sens_slope"]],
  file.path(output_dir, "erdenet_ndvi_sens_slope.tif"),
  overwrite = TRUE )
```

**Хур тунадасны элээх чадавх (RFactor):** Хөрсний зөөгдлийн шинэчилсэн загвар (Revised Universal Soil Loss Equation (RULSE))-ын бүрэлдэхүүн болох RFactor-аар хур тунадас ба гадаргын урсцын элээх чадавхыг тооцохдоо CHIRPS өгөгдлийн сангийн <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS/v3.0/> сайтаас 2000-2022 оны 4-10 сарын хур тунадасны мэдээг ашигласан. Үүнийг тооцох янз бүрийн эмперик математик илэрхийллүүд байдаг ба энэхүү судалгаанд Renard and Freimund (1994) нарын боловсруулсан илэрхийллээр тооцоолоо (Priess et al., 2015; Sodnomdarjaa et al., 2023). Үүнд, дараах илэрхийллээр тооцно:

$$RFactor = 0.04830 * P^{1.61}$$

Энд RFactor нь хур тунадасны элээх чадавх (мж×мм/(гажцаг/ жил))-ыг, P-нь хур тунадасны хэмжээ (мм)-г тус тус илэрхийлнэ.

Судалгаандаа 2000-2022 хугацааны он тус бүр тооцож, тэдгээрийн дундаж утгыг авсан авсан. Тооцооллыг R программ дээр зурагт үзүүлсэн байдлаар код бичин гүйцэтгэж, RFactor-ийн сэдэвчилсэн давхаргыг гаргасан.

```
# =====
# Хур тунадасны элээх чадавх (RFactor) тооцох нь
# Томьёо: R = 0.04830 * P^1.61
# =====
# --- Шаардлагатай сан -----
library(terra)
# =====
# 1. RFactor тооцоход ашиглах растер өгөгдлийн оруулах
# =====
# Оролтын өгөгдөл 1 = Жилийн нийлбэр хур тунадас
precipitation <- rast("D:/01geoecology/CHIRPS/erdenet_annual_precipitation.tif")
# Үр дүнгийн гаралтын өгөгдлийн хадгалах хавтас (folder)
output_folder <- "D:/01geoecology/output"
# =====
# 2. Хур тунадасны элээх чадавхийг тооцох нь
# =====
R_factor <- 0.04830 * (precipitation ^ 1.61)
# =====
# 3. Үр дүнг хадгалах
# =====
writeRaster(R_factor,
            file.path(output_folder, "erdenet_Rfactor.tif"),
            overwrite = TRUE)
```

**Цэгэн ачаалал (PP).** Судалгааны талбайг бүхэлд нь хамарсан 250 м×250 м бүхий торлол үүсгэж, торлолын нэгж талбайд ноогдох өвөлжөө-хаваржааны тоогоор цэгэн ачааллыг тооцоолно. Өвөлжөө-хаваржааны цэгийн *.json* өргөтгөлтэй мэдээг нээлттэй өгөгдлийн нэгдсэн портал болох <https://opendata.gov.mn/> сайтаас татан авсан.

Тус өгөгдлийг ашиглан орон зайн тархалтыг растер бүтэцтэй PP-ийн сэдэвчилсэн давхаргыг R программ дээр зурагт харуулсан байдлаар код бичин гаргаж авсан.

```
# =====
# Цэгэн ачаалал (PP) тооцох
# =====
# --- Шаардлагатай сан -----
library(sf)
library(dplyr)
# =====
# 1. Цэгэн ачаалал тооцоход ашиглах вектор өгөгдлийн оруулах
# =====
# Оролтын өгөгдөл 1 = Нэгж талбай бүхий торлол (grid cell)
grids_sf <- st_read("D:/01geoecology/Grid/erdenet_grid.shp")
# Оролтын өгөгдөл 2 = Хүний хүчин зүйлийн голомтот нөлөөллийг илтгэх цэгэн мэдээлэл
points_sf <- st_read("D:/01geoecology/Human impact/erdenet_wintercamp.shp")
# Үр дүнгийн гаралтын өгөгдлийн хадгалах хавтас (folder)
output_folder <- "D:/01geoecology/output"
# =====
# 2. Торлолын нэгж талбайд ногдох цэгэн өгөгдлийг тооцох
# =====
counts <- lengths(st_intersects(grids_sf, points_sf))
grids_with_count <- grids_sf %>%
  mutate(point_count = counts)
# =====
# 3. Үр дүнг хадгалах
# =====
st_write(grids_with_count,
         file.path(output_folder, "erdenet_point_impact.shp"),
         delete_layer = TRUE, append = FALSE)
```

**Шугаман ачаалал (LP).** Хүний үйл ажиллагаанаас орчинд үзүүлж буй шугаман ачаалалд олон улсын, улсын, аймгийн зэрэглэлтэй хатуу хучилттай авто зам, сайжруулсан шороон зам, ердийн шороон зам, төмөр замыг авч үзсэн ба өгөгдлийг бүрдүүлэхдээ Open Street Map платформ <https://www.openstreetmap.org>, төмөр замын мэдээг нээлттэй өгөгдлийн нэгдсэн портал <https://opendata.gov.mn/>-аас тус тус татаж боловсруулсан болно. Шороон замын сэдэвчилсэн давхаргыг Google Earth Pro-гоос дижитайз хийх замаар үүсгэсэн. Ингэхдээ судалгааны талбайг бүхэлд нь хамарсан 250 м×250 м бүхий торлол үүсгэж, торлолын нэгж талбайд ногдох замын уртыг м-ээр авсан. Тооцооллыг мөн адил R программ дээр код бичиж гүйцэтгэсэн бөгөөд зурагт бичигдсэн кодыг дэлгэрэнгүй харуулав.

```
# =====
# Шугаман ачаалал (LP) тооцох
# =====
# --- Шаардлагатай сан -----
library(sf)
library(dplyr)
# =====
# 1. Шугаман ачаалал тооцоход ашиглах вектор өгөгдлийн оруулах
# =====
# Оролтын өгөгдөл 1 = Нэгж талбай бүхий торлол (grid cell)
grids_sf <- st_read("D:/01geoecology/Grid/erdenet_grid.shp")
# Оролтын өгөгдөл 2 = Хүний хүчин зүйлийн шугаман нөлөөллийг илтгэх мэдээлэл
lines_sf <- st_read("D:/01geoecology/Human impact/erdenet_roads.shp")
# Үр дүнгийн гаралтын өгөгдлийн хадгалах хавтас (folder)
output_folder <- "D:/01geoecology/output"
# =====
# 1. Шугаман ачаалал тооцох
# =====
grids_sf <- grids_sf %>%
  mutate(grid_id = row_number())
# Оролтын өгөгдлүүдийг давхцуулж, торлолын нэгж талбайд харгалзах шулууны уртыг тооцох
inter <- st_intersection(
  st_set_agr(lines_sf, "constant"),
  st_set_agr(grids_sf, "constant") )
inter$length_m <- as.numeric(st_length(inter))
# Торлолын нэгж талбайд ногдох шулуунуудын нийт уртыг тооцож, уртын тоон үзүүлэлтийг атрибут
# хүснэгтэд нэгтгэх
length_per_grid <- inter %>%
  st_drop_geometry() %>%
  group_by(grid_id) %>%
  summarise(total_length_m = sum(length_m, na.rm = TRUE),
            .groups = "drop")
result <- grids_sf %>%
  left_join(length_per_grid, by = "grid_id") %>%
  mutate(total_length_m = coalesce(total_length_m, 0))
# =====
# 3. Үр дүнг хадгалах
# =====
st_write(result, file.path(output_folder, "erdenet_line_impacts.shp"), delete_layer = TRUE)
```

**Талбайн ачаалал (AP).** Хүний үйл ажиллагаанаас орчинд үзүүлж буй талбайн ачаалалд аймгийн төв, сумын төв, хогийн цэг, уул уурхайн үйл ажиллагаа явагдсан болон явагдаж буй талбай, тариалангийн талбайг авч үзэх бөгөөд Европын Сансрын Агентлагийн 10 м-ийн орон зайн нарийвчлалтай ESA World Cover газрын бүрхэвчийн 2021 оны бүтээгдэхүүн (<https://esa-worldcover.org/en>)-ээс суурин газар, уул уурхайн газрын растер өгөгдлийг бүрдүүлнэ. Тариалангийн газар, хогийн цэгийн сэдэвчилсэн давхаргыг Google Earth Pro-гоос дижитайз хийх замаар үүсгэнэ. Түүнчлэн өмнөхтэй адил судалгааны талбайг бүхэлд нь хамарсан 250 м×250 м талбай бүхий торлол үүсгэж, торлолын нэгж талбайд ногдох дээрх газар ашиглалтын хэлбэрүүдийн талбайг га-аар авч тооцоолсон болно. Өмнөхтэй адил R программ дээр код бичиж AP-ийн сэдэвчилсэн давхаргыг гаргасан бөгөөд зурагт кодыг үзүүллээ.

```
# =====
# Талбайн ачаалал (AP) тооцох
# =====
# --- Шаардлагатай сан -----
library(sf)
library(dplyr)
# =====
# 1. Цэгэн ачаалал тооцоход ашиглах вектор өгөгдлийн оруулах
# =====
# Оролтын өгөгдөл 1 = Нэгж талбай бүхий торлол (grid cell)
grid <- st_read("D:/01geoecology/Grid/erdenet_grid.shp")
# Оролтын өгөгдөл 2 = Хүний хүчин зүйлийн голомтот нөлөөллийг илтгэх цэгэн мэдээлэл
area <- st_read("D:/01geoecology/Human impact/erdenet_impacted_area.shp")
# Үр дүнгийн гаралтын өгөгдлийн хадгалах хавтас (folder)
output_folder <- "D:/01geoecology/output"
# =====
# 2. Талбайн ачаалал тооцох
# =====
# Торлолын нэгж талбай тус бүрийг дахин давтагдашгүй дугаар (unique ID)-аар дугаарлах
if (!"id" %in% names(grid)) {
  grid$id <- 1:nrow(grid) }
# Оролтын өгөгдлүүдийг давхцуулж, торлолын нэгж талбай (m2)-д харгалзах газар ашиглалтын
# хэлбэрүүдийн талбайн хэмжээг га-аар тооцох, талбайн тоон үзүүлэлтийг атрибут хүснэгтэд
# нэгтгэх
intersections <- st_intersection(area, grid)
intersections$area_ha <- as.numeric(st_area(intersections)) / 10000
area_summary <- intersections %>%
  st_drop_geometry() %>%
  group_by(id) %>%
  summarise(area_ha = sum(area_ha, na.rm = TRUE))
grid_with_area <- left_join(grid, area_summary, by = "id")
grid_with_area$area_ha[is.na(grid_with_area$area_ha)] <- 0
# =====
# 3. Үр дүнг хадгалах
# =====
st_write(grid_with_area,
         file.path(output_folder, "erdenet_area_impact.shp"), delete_layer = TRUE)
```

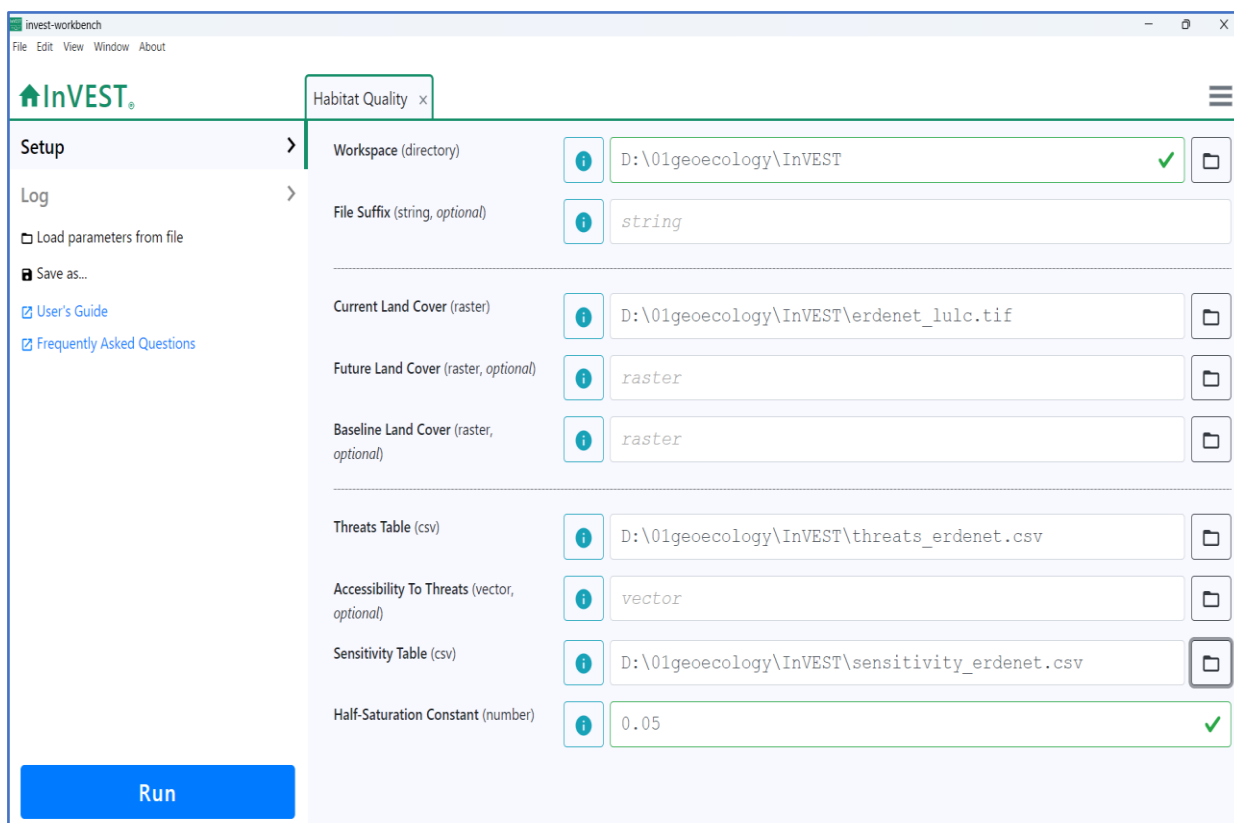
**Амьдрах орчны чанар индекс (HQ).** Амьдрах орчны чанар нь тухайн бүс нутгийн биологийн олон янз байдлын түвшнийг илэрхийлдэг (Wei et al., 2022). HQ сэдэвчилсэн давхаргыг үүсгэхийн тулд InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) загварын Habitat Quality модулийг ажиллуулсан. Загварын оролтын өгөгдөлд өвөлжөө-хаваржааны байршил, төмөр замын вектор мэдээг Нээлттэй өгөгдлийн нэгдсэн портал (<https://opendata.gov.mn/>)-аас, газар ашиглалтын растер мэдээг Европын Сансрын Агентлагийн ESA World Cover газрын бүрхэвчийн бүтээгдэхүүн (<https://esa-worldcover.org/en>)-ээс, авто замын вектор мэдээг Open Street Map платформ (<https://www.openstreetmap.org>)-оос татан авч оруулсан. Түүнчлэн шороон зам, тариалангийн газрын өгөгдлийг Google Earth Pro-гоос дижитайз хийх замаар бүрдүүлсэн.

Тус загварыг <https://naturalcapitalalliance.stanford.edu/software/invest> цахим сайтаас үнэ төлбөргүй татан авч, ашиглах боломжтой бөгөөд доор зурагт үзүүлсэн байдлаар дараах алхмуудыг хийж гүйцэтгэнэ. Энд сонголтоор буюу optional талбарын тайлбарыг оруулаагүй болно.

1. InVEST программыг нээж, Habitat Quality загварыг сонгоно.
2. Habitat Quality загварын ажлын талбар (интерфэйс) нээгдэх ба Workspace (directory) хэсэгт дүн шинжилгээний явцад үүсэх завсрын боловсруулалтын түр файлууд болон загварын эцсийн үр дүнгийн файл автоматаар хадгалагдах хавтас (folder)-ны байршлыг зааж өгнө.
3. Current Land Cover (raster) талбарт судалгааны талбайн газар ашиглалт, газрын бүрхэвчийн өнөөгийн байдлыг илтгэх растер өгөгдлийг оруулна.
4. Threats Table (csv) талбарт амьдрах орчинд дарамт учруулах хүний хүчин зүйлс (threats), тэдгээрийн нөлөөллийн радиус, нөлөөлөл буурах функц, дарамт учруулагч бусад хүчин зүйлстэй харьцуулахад тухайн хүчин зүйлийн амьдрах орчин үзүүлэх харьцангуй нөлөөллийн жин зэрэг мэдээллийг агуулсан .csv файлыг оруулна.
5. Sensitivity Table (csv) талбарт биологийн олон янз байдлын амьдрах орчинд газрын бүрхэвчийн ангиудын тохиромжтой байдал болон амьдрах орчинд дарамт учруулах хүний хүчин зүйлсэд газрын бүрхэвчийн ангиудын (амьдрах орчны) мэдрэмтгий байдлын мэдээллийг агуулсан .csv файлыг оруулна.
6. Half-Saturation Constant (number) талбарт хагас ханалтын тогтмол утгыг оруулна. Энэ утга нь тухайн судалгааны талбайн амьдрах орчны

доройтлын зэргээс хамаарч тодорхойлогддог. “InVEST Habitat Quality model” хэрэглэгчийн гарын авлагад энэхүү тогтмолын анхдагч утгыг (default value) 0.05 гэж заасан байдаг.

7. Run товчийг дарснаар загвар ажиллаж, амьдрах орчны чанарын растер өгөгдөл бэлэн болно.



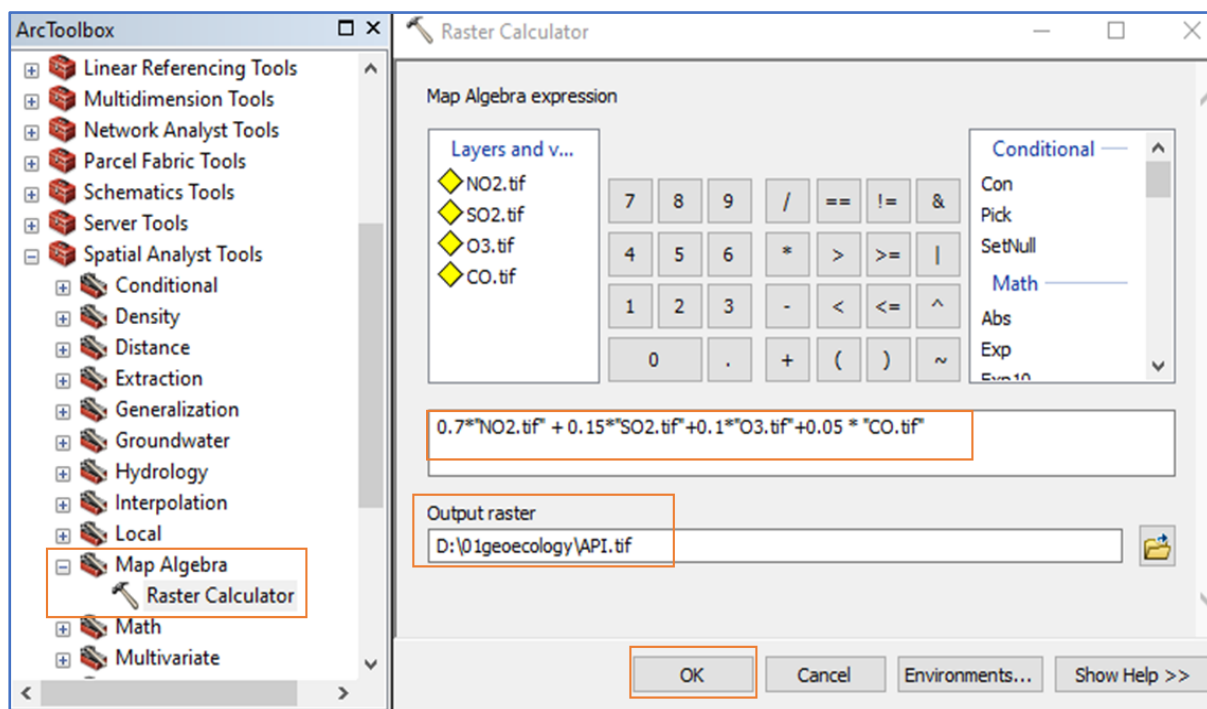
**Агаарын бохирдлын индекс (API).** Европын Сансрын Агентлаг (ESA)-ийн Sentinel-5P хиймэл дагуулын TROPOMI мэдрэгчийн агаар бохирдуулагч бодисын 2019-2022 оны өгөгдлийг <https://esa-worldcover.org/en> сайтаас татан авч, урьдчилан боловсруулалт хийсэн. Эдгээр өгөгдлийг нэг стандартад оруулахын тулд нормчилж дараах байдлаар нэгтгэн агаарын бохирдлын индексийг гаргасан (Wang et al., 2022). Үүнд:

$$API = 0.7(NO_2) + 0.15(SO_2) + 0.1(O_3) + 0.05(CO)$$

Энд API-агаарын бохирдлын индекс, NO<sub>2</sub>-азотын давхар ислийн агууламж, SO<sub>2</sub>-хүхэрлэг хийн агууламж, O<sub>3</sub>-озоны агууламж CO-нүүрс төрөгчийн дутуу ислийн агууламж.

1. Доор зурагт үзүүлсний дагуу ArcGIS 10.8 программын **ArcToolbox** → **Spatial analyst tools** → **Map Algebra** → **Raster Calculator** цэсийг СОНГОН НЭЭНЭ.

2. Томьёо бичих талбарт Sentinel-5P хиймэл дагуулын татаж авч урьдчилан боловсруулалт хийсэн өгөгдлийг ашиглан API-ийг тооцох томьёог бичиж өгнө.
3. **Output raster**-д судалгааны талбайн API-ийг тооцон гарах орон зайн тархалтын зургийн нэрийг өгч, хадгалах замыг зааж ОК товчийг дарна.



## II. Үнэлгээнд ашиглагдах хувьсагчдыг нэг стандартад оруулах, нормчлох

Үнэлгээнд ашиглагдах дээрх сэдэвчилсэн давхаргууд /цаашид хувьсагч гэх/ нь гридийн олонлогоос бүрдэх растер бүтэцтэйгээс гадна, ялгаатай орон зайн шийдтэй. Иймээс бүх өгөгдлийг Resample техникийг ашиглан 250м×250 м-ийн орон зайн шийд рүү хөрвүүлэх шаардлагатай. Түүнчлэн үнэлгээний тооцоонд ашиглах үндсэн шаардлагын хүрээнд үйлчлэх чиглэлийн дагуу нормчилно. Үүний тулд дараах алхмуудыг гүйцэтгэнэ.

*Resample арга нь орон зайн сан нь гридийн нүднүүдийн олонлогоос бүрдсэн растер өгөгдлийг грид нүд бүрээр дахин тооцоолох замаар шинэ растер өгөгдлийг гарган авах арга юм. Ингэхдээ интерполяцийн ойрх хөрш, хос шугаман болон кубик конволюцын аргаар растер өгөгдлийг хувиргадаг. Судалгаанд ашигласан хос шугаман интерполяцийн арга нь тухайн нүдэнд хамгийн ойр орших 4 нүдийг ашиглан интерполяци хийж, шинэ растерыг гарган авдаг. Энэ арга анхдагч утгыг бүдгэрүүлдэг хэдий ч тасралтгүй өгөгдөл дээр суурилсан сэдэвчилсэн зурагт тохиромжтой арга юм.*



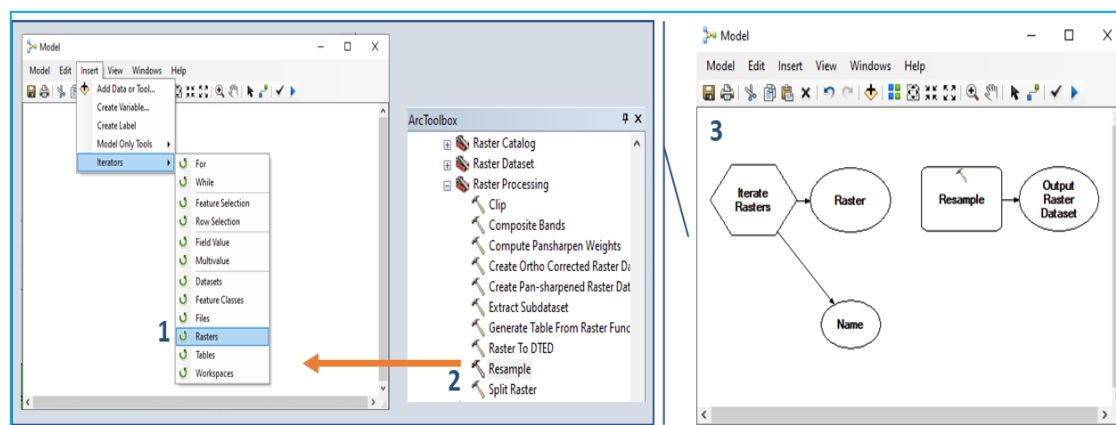
*ArcGIS10.8 программын ModelBuilder-ийг ашиглан ялгаатай растер өгөгдлүүдийг ижил проекц, орон зайн шийдэд оруулна.*

### Алхам 1:

1-1. ArcGIS10.8 программын **ModelBuilder** нээнэ → **Insert** → **Iterators** → **Raster (1)**;

1-2. ArcGIS 10.8 программын **ArcToolbox** → **Resample**-ийг **Model**-ийн талбарт оруулна **(2)**;

1-3. 1-2 алхамыг хийсний дараа **(3)** хэлбэртэй харагдана;




1-4. **Iterate Rasters** -д оролтын хувьсагчдыг агуулсан фолдерын замыг зааж өгнө;

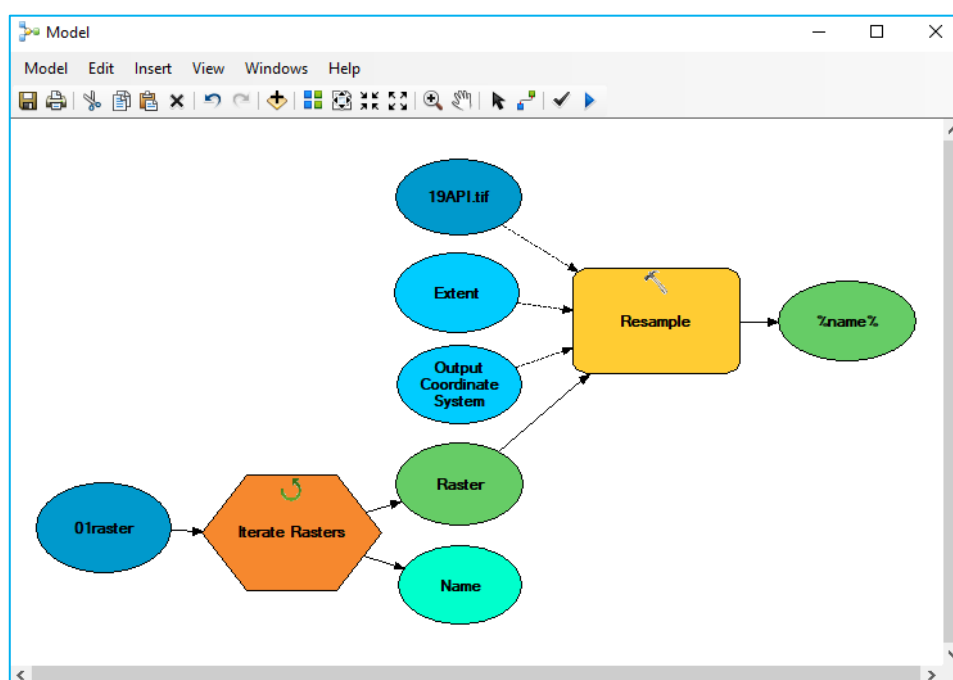
1-5.  - товчийг дарж Resample-д холбож өгнө;

1-6. Resample буюу гаралтын хувьсагчдын шинж чанарыг тодорхойлж өгнө. Үүнд хулганы баруун товчийг дарж интерполяц хийх арга, координатын систем, пикселийн хэмжээг дараах байдлаар тохируулна.

- Resample→Resampling Technique→ BILINEAR
- Resample → Make Variable → From Environment → Output Coordinate
- Resample→Make Variable → From Environment → Processing Extent → Extent → Загвар хувьсагчийн нэрийг сонгоно (энд судалгааны талбайгаар тасдан авсан бидний урьдчилж бэлдсэн 250 м-ийн орон зайн шийдтэй растер өгөгдлийг загвар болгон зааж өгнө)
- Resample → Make Variable → From Environment → Processing Extent → Snap Raster → Загвар хувьсагчийн нэрийг сонгоно.

1-7. **Resample→ Output raster Dataset→ %name%** (гаралтын хувьсагчдын байрших фолдерын замыг зааж %name% бичсэнээр хувьсагчдын нэр анхдагч оролтын хувьсагчидтай ижил нэртэйгээр гарна)

1-8. Дээрх үйлдлүүдийг дэс дараалуулан тохируулсны дараа  товч дээр дарж үйлдлийг шалган, ажиллуулна.



**Алхам 2.** Дээрх алхам 1-ийн дагуу нэг стандартад орсон хувьсагчдыг доорх томъёог ашиглан ArcGIS10.8 программын **Raster Calculator**-ийг ашиглан нормчилно.

Эерэг (үйлчлэх чиглэл) хувьсагч:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}$$

Сөрөг (үйлчлэх чиглэл) хувьсагч:

$$r_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}$$

Энд  $r_{ij}$  -хувьсагчийн нормчилсон утга,  $x_{ij}$ -нь  $j$ -хувьсагчийн тухайн  $i$ -пиксел дээрх утга,  $\max(x_{ij})$ ,  $\min(x_{ij})$  -нь тухайн растер бүтэцтэй хувьсагчийн пикселийн хамгийн их, бага утгыг илэрхийлнэ. Энд нормчилохдоо Хүснэгтэд харуулсны дагуу системд үзүүлэх нөлөөллөөр нь авсан үйлчлэх чиглэлийг харгалзан үзнэ.

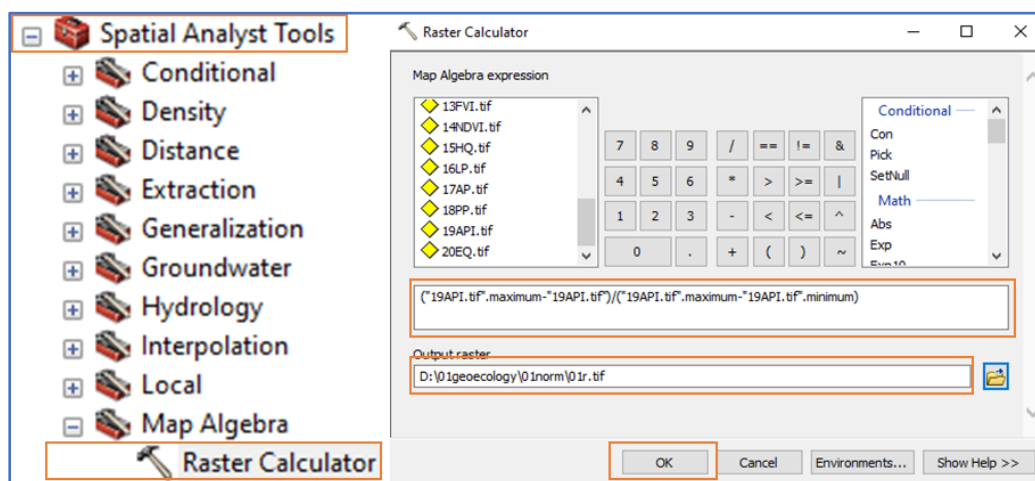
Системд үзүүлэх нөлөөллөөр нь авсан үйлчлэх чиглэлийн хүснэгт

№	Сэдэвчилсэн давхарга буюу хувьсагч (товчлол)	Үйлчлэх чиглэл
1	Хамгийн дулаан сарын хамгийн их температур (Warmest)	-
2	Нийлбэр хур тунадас (P)	+
3	Мезенцевийн чийгшлийн итгэлцүүр (MI)	+
4	Уур амьсгалын биологийн үр ашгийн индекс (TK)	+
5	Хур тунадасны элээх чадавх (RFactor)	-
6	Гадаргын өндөр (DEM)	-
7	Гадаргын налуу (Slope)	-
8	Гадаргын бартаат байдлын индекс (TRI)	-
9	Гадаргын урсацын сүлжээний нягтшил (DRD)	-
10	Хөрсний ширхгийн бүрэлдэхүүний индекс (TGSI)	-
11	Хөрсний органик карбон (SOC)	+
12	Усны нормчлогдсон ялгаврын индекс (NDWI)	+
13	Ургамлын фракцын индекс (FVI)	+
14	Ургамлын нормчлогдсон ялгаврын индексийн өөрчлөлт ( $\Delta$ NDVI)	+
15	Амьдрах орчны чанар индекс (HQ)	+
16	Шугаман ачаалал (LP)	-
17	Талбайн ачаалал (AP)	-
18	Цэгэн ачаалал (PP)	-
19	Агаарын бохирдлын индекс (API)	-
20	Газар хөдлөлт (EQ)	-

## 2-1. ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Raster Calculator

2-2. Томьёо бичих хэсэгт үйлчлэх чиглэлийг харгалзсан тухайн растер хувьсагчид тохирох томьёог бичиж өгнө. Зурагт Агаарын бохирдлын индекс (API)-ийг жишээ болгож оруулсан

2-3. **Output raster**-т хувьсагчийн гаралтын замыг заан **OK** товчийг дарна. Эдгээр үйлдлийг бүх хувьсагч бүр дээр гүйцэтгэнэ.



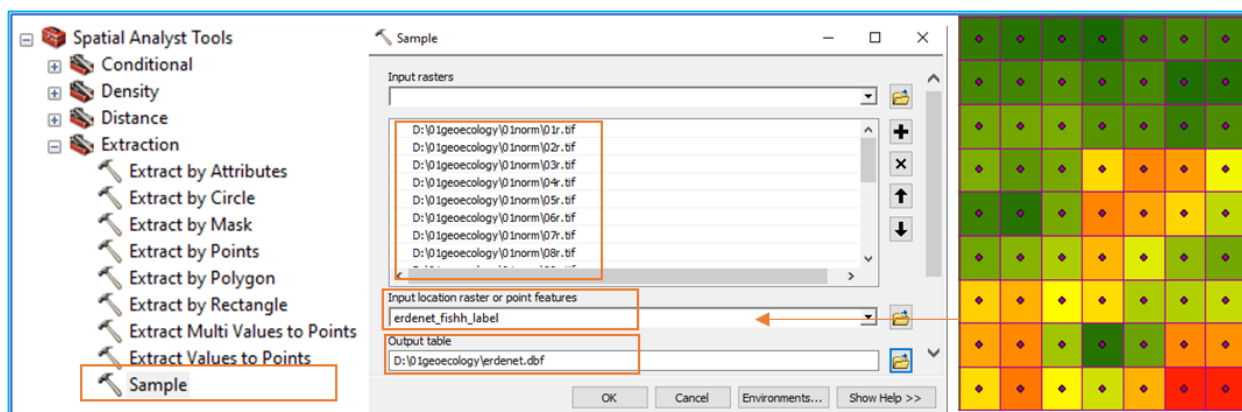
**Алхам 3.** Дээрх алхам 1 болон 2-ыг гүйцэтгэсний дараа энтропи жинг тодорхойлохын тулд ArcGIS10.8 программын **Sample** -хэрэгслийг ашиглан гридийн нүдэнд харгалзах пикселийн утгыг хүснэгт хэлбэрээр гаргаж авна. Үүний тулд алхам 3-ийг зурагт дүрсэлснээр дэс дараалан хийнэ.

## 2-4. ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Sample

2-5. **Input raster**-т нормчилсон хувьсагчдыг оруулна

2-6. **Input location raster or point feature** -т зурагт харуулсан **Create Fishnet**-ээр үүсгэсэн 250м-ийн гридийн нүдэнд харгалзах цэгийг оруулж өгнө

2-7. **Output table** -т хүснэгтийн байрших замыг заана.



### III. Энтропи жинг тодорхойлох

Үнэлгээнд ашиглагдах хувьсагчдыг өмнө дурдсан алхмуудаар нэг стандартад оруулан, нормчлон хүснэгт хэлбэрээр гарган авсан хүснэгтийг ашиглан *Шенноны мэдээллийн энтропи* аргаар жинг тодорхойлно (Мижиддорж., 2009).

Жинг тооцохдоо Python 3.13 программчлалын хэл дээр код бичиж тооцоолсон. Үүнд код нь зурагт үзүүлснээр 1) өгөгдлийг оруулах, 2) жинг тооцох томъёонд өгөгдлийг оруулах, 3) үр дүнг хүснэгт хэлбэрт оруулах, 4) үр дүнг .csv өргөтгөлөөр хадгалах гэсэн үндсэн 4 хэсгээс бүрдэнэ.

```
#Ашиглагдах сангууд
import pandas as pd
import numpy as np
# =====
# 1. Хүснэгтийг оруулж, унших
# =====
df =pd.read_csv('D:/01geoecology/erdenet.csv')
# зөвхөн тоон өгөгдөл авах
data = df.select_dtypes(include=[np.number]).values
# =====
# 2. Энтропи жинг тооцох
# =====
# Томъёо 3
P = data / np.sum(data, axis=0)
# # Томъёо 4
n = data.shape[0]
k = 1 / np.log(n)
entropy = -k * np.sum(P * np.log(P + 1e-12), axis=0)
# Томъёо 5
d = 1 - entropy
# weights
weights = d / np.sum(d)
# =====
# 3. Үр дүн dataframe болгох
# =====
result = pd.DataFrame({
    "Variable": df.columns,
    "Weight": weights
})
# эрэмбэлэх (ихээс бага)
result = result.sort_values(by="Weight", ascending=False)
print(result)
# =====
# 4. CSV хадгалах
# =====
result.to_csv("entropy_weights.csv", index=False)
```

Түүнчлэн хүснэгтээр тооцоолсон жингийн үр дүнг харуулав.

Тооцоолсон жингийн хүснэгт

№	Хувьсагч (товчлол)	Жин ( $w_{ibase}$ )	Эрэмбэ
1	Хамгийн дулаан сарын хамгийн их температур (Warmest)	0.093	16
2	Нийлбэр хур тунадас (P)	0.065	14
3	Мезенцевийн чийгшлийн итгэлцүүр (MI)	0.119	20
4	Уур амьсгалын биологийн үр ашгийн индекс (TK)	0.079	15
5	Хур тунадасны элээх чадавх (RFactor)	0.105	18
6	Гадаргын өндөр (DEM)	0.035	10
7	Гадаргын налуу (Slope)	0.028	8
8	Гадаргын бартаат байдлын индекс (TRI)	0.017	4
9	Гадаргын урсцын сүлжээний нягтшил (DRD)	0.025	7
10	Хөрсний ширхгийн бүрэлдэхүүний индекс (TGSI)	0.036	11
11	Хөрсний органик карбон (SOC)	0.023	6
12	Усны нормчлогдсон ялгаврын индекс (NDWI)	0.117	19
13	Ургамлын фракцын индекс (FVI)	0.022	5
14	Ургамлын нормчлогдсон ялгаврын индексийн өөрчлөлт ( $\Delta$ NDVI)	0.006	3
15	Амьдрах орчны чанар индекс (HQ)	0.047	12
16	Шугаман ачаалал (LP)	0.004	2
17	Талбайн ачаалал (AP)	0.093	17
18	Цэгэн ачаалал (PP)	0.001	1
19	Агаарын бохирдлын индекс (API)	0.03	9
20	Газар хөдлөлт (EQ)	0.056	13

#### IV. TOPSIS шийдвэр гаргалтын аргаар геоэкологийн нөхцөлийн индексийг тооцох

Энтропийн жинд суурилсан TOPSIS шийдвэр гаргалтын арга нь хосолсон (hybrid) аргад хамаарах бөгөөд сонгон авсан өгөгдлүүдийн (геосистемийн бүрэлдэхүүн хэсгүүд) дотоод бүтцийн шинж чанар, түүнд явагдаж буй өөрчлөлтөд үндэслэн үзүүлэлтүүдийн жинг тодорхойлдог тул субъектив үнэлгээний нөлөөг багасгах, тоон өгөгдөлд тулгуурласан илүү бодитой үнэлгээ гаргах боломжийг бүрдүүлдэг давуу талтай (Shanon., 1948; Hwang and Yoon., 1981).

Өмнөх бүлэгт дурдсан аргаар тодорхойлсон хувьсагч бүрийн энтропи жинг ашиглан TOPSIS аргаар геоэкологийн нөхцөлийн нэгдсэн үнэлгээний индексийг тооцохдоо дараах томъёонуудыг ашиглана. Үүнд:

Тооцоолсон энтропи жингээр нормчилсон растер бүтэцтэй хувьсагчийг үржүүлэн жинлэсэн шийдвэрийн матрицыг байгуулна. Үүнд, матрицыг дараах байдлаар илэрхийлж болно.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_{1base}r_{11} & w_{2base}r_{12} & w_{mbase}r_{1m} \\ w_{1base}r_{21} & w_{2base}r_{22} & \dots & w_{mbase}r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{1base}r_{n1} & w_{2base}r_{n2} & \dots & w_{mbase}r_{nm} \end{bmatrix}$$

Энд  $w_{1base}r_{11}$ -матрицын элемент нь бидний сонгон авсан хамгийн дулаан сарын хамгийн их температур (Warmest)-ын жинлэсэн хувьсагчийн пиксел дээрх утга юм.  $m$ -нь хувьсагчийг дугаар,  $n$ -нь тухайн хувьсагчийн пикселийн тоо.

Эдгээрээс жинлэсэн хувьсагч бүрийн хамгийн их ( $V_j^+$ ), бага ( $V_j^-$ ) утгыг авч эерэг, сөрөг идеал шийдлийг тодорхойлно. Үүнд:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2}$$

Энд  $D_j^+, D_j^-$ -нь геоэкологийн нөхцөл харгалзан хамгийн сайн байх критер утгаас хэр ойр, хол байхыг илэрхийлэх эерэг, сөрөг идеал шийдэл юм. Өөрөөр хэлбэл, хамгийн их утга ( $D_j^+$ )-ын хувьд геоэкологийн маш сайн нөхцөлөөс хол байх зайг,  $D_j^-$ -нь геоэкологийн нөхцөл маш сул байх утгаас хол байх зайг илэрхийлсэн идеал утга юм. Эдгээр эерэг, сөрөг идеал шийдэл ( $D_j^+, D_j^-$ )-ийг нэгтгэн геоэкологийн нөхцөлийн нэгдсэн үнэлгээний индекс (GCI)-ийг дараах томъёогоор тооцоолно:

$$GCI_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

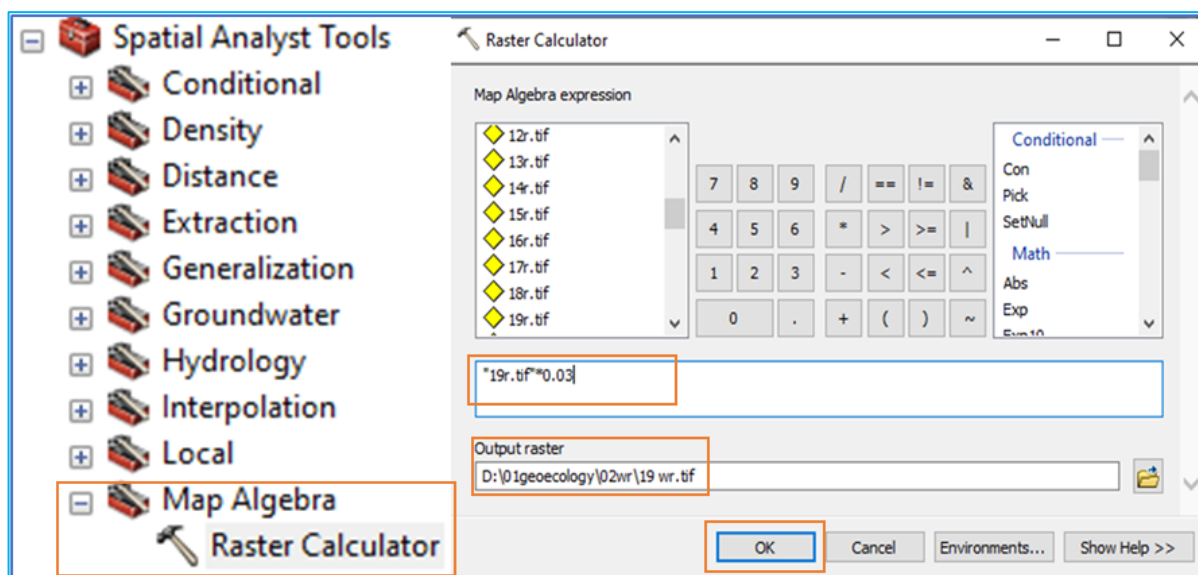
Дурдсан томъёоуудын дагуу Геоэкологийн нөхцөлийн нэгдсэн үнэлгээний зургийг гаргахдаа **ArcToolbox** → **Spatial Analyst Tools** → **Raster Calculator** хэрэгслийг ашиглан доорх алхмуудыг дэс дараалан гүйцэтгэнэ. Үүнд:

### Алхам 1 /энтропи жингээр нормчилсон хувьсагчийг үржүүлэх/:

1-1. **ArcToolbox** → **Spatial Analyst Tools** → **Raster Calculator** нээнэ.

1-2. Raster Calculator-ын томъёо бичих хэсэгт нормчилсон хувьсагчийг харгалзах жингээр үржүүлнэ. Зурагт жишээ болгон Агаарын бохирдлын индекс (API)-ийн нормчилсон растер өгөгдөл 19r.tif -ийг жишээ болгон харууллаа.

1-3. **Output raster**-т хувьсагчийн гаралтын замыг зааж өгнө **OK** товчийг дарна. Эдгээр үйлдлийг бүх хувьсагч бүр дээр гүйцэтгэнэ.



### Алхам 2 /жинлэсэн хувьсагч бүрийн хамгийн их ( $V_j^+$ ), бага ( $V_j^-$ ) утгыг олох/:

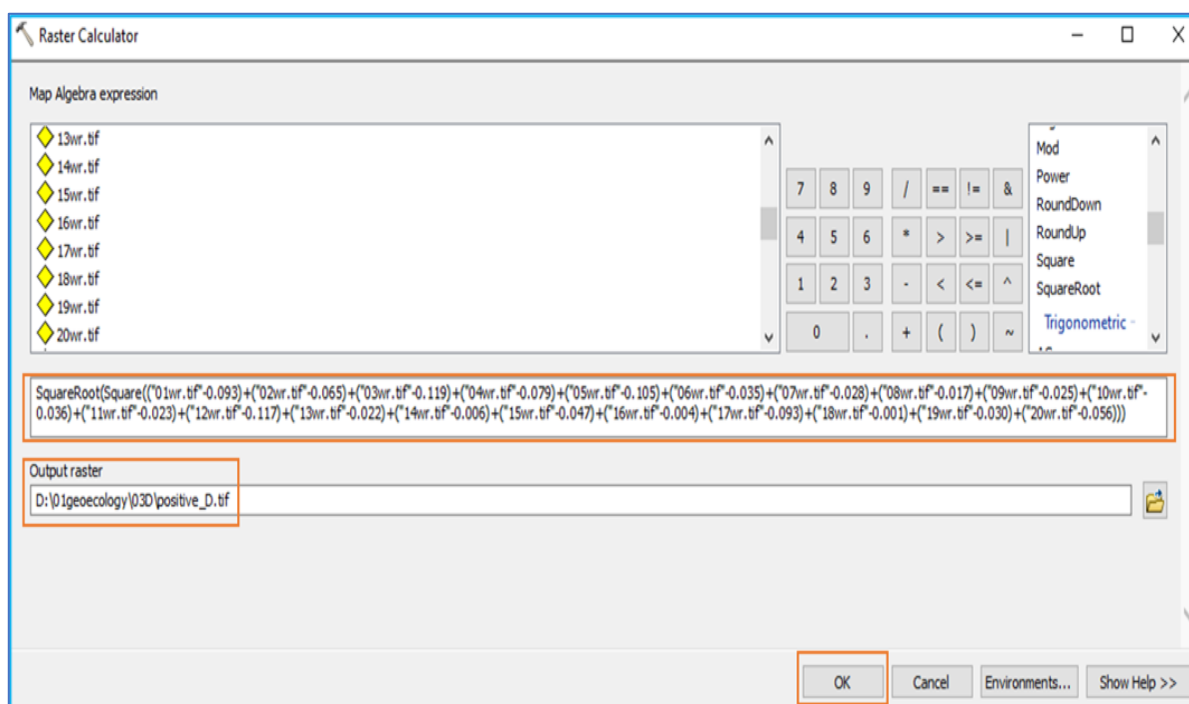
2-1. Жингээр үржүүлэн гарсан растер хувьсагч бүрийн пиксел дээрх хамгийн их ( $V_j^+$ ), бага ( $V_j^-$ ) утгыг тэмдэглэн авна. Жишээ нь, *19wr.tif* хувьсагчийн хувьд  $\max=0.03$ ,  $\min=0$  байна. Энд бидний нормчилсон растер хувьсагчдын утга нь 0-ээс 1-ийн хооронд утгатай байх тул хамгийн их утга нь энтропи жингийн утгатай тэнцүү бол хамгийн бага утга нь 0-тэй тэнцүү байна.

**Алхам 3 /( $D_j^+$ ),  $D_j^-$ ) - эерэг, сөрөг идеал шийдлийг тооцох/:**

3-1. **ArcToolbox** → **Spatial Analyst Tools** → **Raster Calculator** нээнэ.

3-2. Raster Calculator-ын томъёо бичих хэсэгт зурагт илэрхийлсэн байдлаар томъёог бичиж эерэг идеал ( $D_j^+$ )-ийн орон зайн тархалтыг зургийг тооцоолон гаргана.

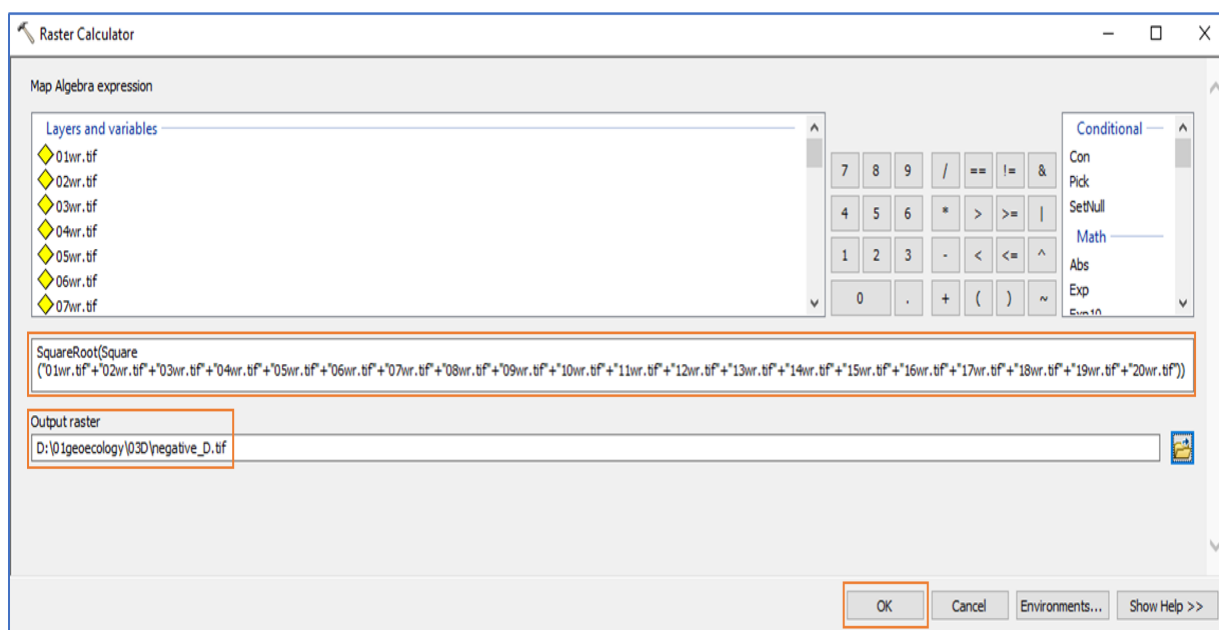
3-3. **Output raster**-т эерэг идеал ( $D_j^+$ )-ийн гаралтын замыг зааж, хадгалах нэрийг бичиж **ОК** товчийг дарж хадгална.



3-4. **ArcToolbox** → **Spatial Analyst Tools** → **Raster Calculator** нээнэ.

3-5. Raster Calculator-ын томъёо бичих хэсэгт зурагт илэрхийлсэн байдлаар томъёог бичиж сөрөг идеал ( $D_j^-$ )-ийн орон зайн тархалтыг зургийг гаргана.

3-6. **Output raster**-т сөрөг идеал ( $D_j^-$ )-ийн гаралтын замыг зааж, хадгалах нэрийг бичиж **ОК** товчийг дарж хадгална.

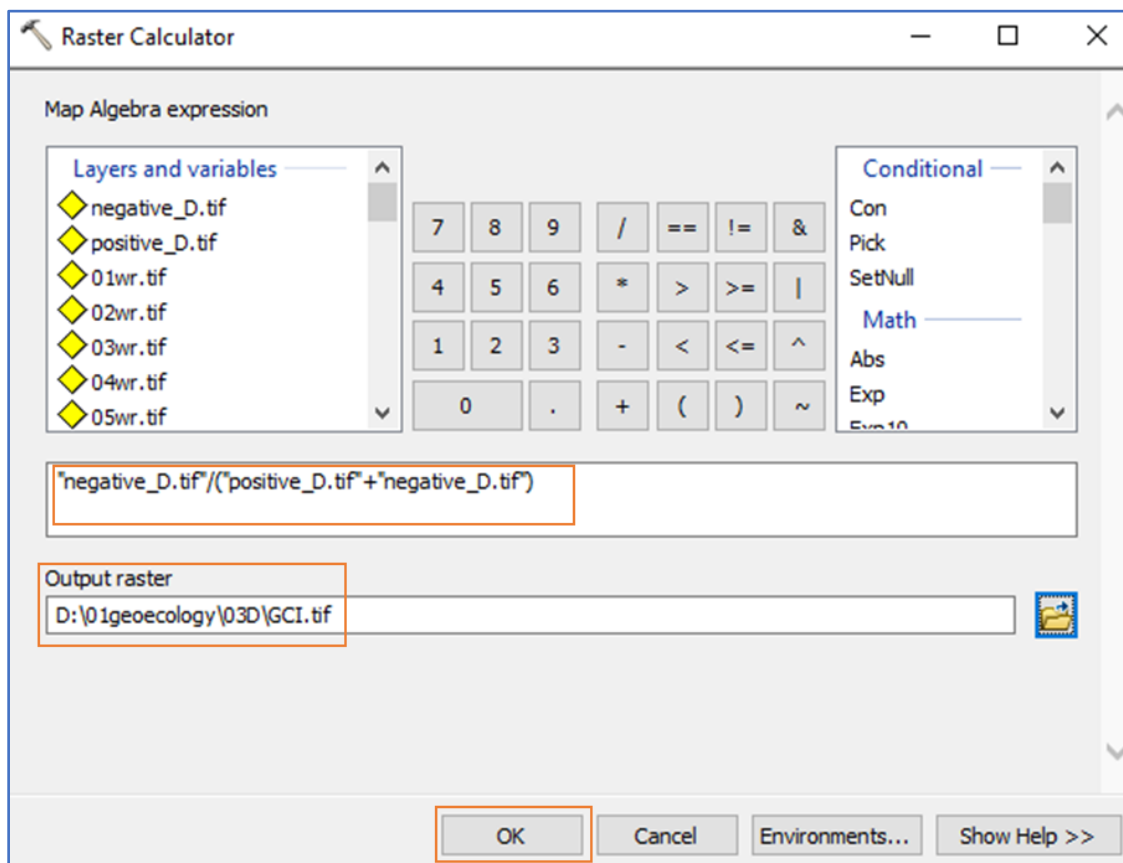


**Алхам 4  $I(D_j^+, D_j^-)$ -ийг нэгтгэн геоэкологийн нөхцөлийн нэгдсэн үнэлгээний индекс (GCI)-ийг тооцох/:**

4-1. ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Raster Calculator нээнэ.

4-2. Raster Calculator-ын томъёо бичих хэсэгт зурагт илэрхийлсэн байдлаар томъёог бичиж геоэкологийн нөхцөлийн индекс (GCI)-ийн орон зайн тархалтыг зургийг гаргана.

3-6. Output raster-т геоэкологийн нөхцөлийн индекс (GCI)-ийн орон зайн тархалтын гаралтын замыг заан, хадгалах нэрийг бичиж ОК товчийг дарж хадгална.



#### IV. Мэдрэмжийн шинжилгээ

$GCI_t$ -геоэкологийн үнэлгээ нь хэр тогтвортой эсэхийг мэдрэмжийн шинжилгээгээр шалгана. Үүний тулд, хамгийн их жинг үзүүлсэн хувьсагчийн жин ( $w_{jbase}$ )-г 10 хувиар нэмэгдүүлж, бусад жинг нийт хувьсагчийн жингийн нийлбэрт харьцуулан дахин жин ( $w_{jsen}$ )-г тодорхойлж өмнөх бүлэгт дурдсан Алхам 1-4-ийг давтан гүйцэтгэнэ. Эцэст нь, мэдрэмжийн шинжилгээгээр гарсан геоэкологийн нөхцөлийн индекс ( $GCI_{isen}$ )-ийн орон зайн тархалт хэрхэн өөрчлөгдсөн байдлыг тооцоолсон үндсэн геоэкологийн нөхцөлийн индекс ( $GCI_t$ )-ийн орон зайн тархалтаас хасаж алдааг тооцон дүн шинжилгээ хийнэ.

**Ашигласан материал**

- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple attributes decision making methods and applications. Berlin: Springer.
- Jiang, Z., Huete, A. R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., & Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 101(3), 366–378. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003>
- Khavtgai, Z., Damba, I., & Tserengunsen, P. (2022). Effect of land use on soil organic carbon fractions. *Mongolian Journal of Geography and Geoecology*, 92–99. <https://doi.org/10.5564/mjgg.v59i43.2516>
- Khavtgai, Z., Dugersuren, B., Damba, I., & Tserengunsen, P. (2023). Soil active organic carbon and carbon management index in different land use types. *Mongolian Journal of Geography and Geoecology*, 60(44), 215–221. <https://doi.org/10.5564/mjgg.v60i44.3075>
- McFEETERS, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Poggio, L., de Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *SOIL*, 7(1), 217–240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Priess, J. A., Schweitzer, C., Batkhishig, O., Koschitzki, T., & Wurbs, D. (2015). Impacts of agricultural land-use dynamics on erosion risks and options for land and water management in Northern Mongolia. *Environmental Earth Sciences*, 73(2), 697–708. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3380-9>
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3), 379–423.
- Sodnomdarjaa, E., Lehmkuhl, F., Karthe, D., Knippertz, M., & Ganbat, G. (2023). Assessment of soil loss using RUSLE around Mongolian mining sites: A case study on soil erosion at the Baganuur lignite and Erdenet copper-molybdenum mines. *Environmental Earth Sciences*, 82(9), 230. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10897-0>
- Wang, Y., Cai, G., Yang, L., Zhang, N., & Du, M. (2022). Monitoring of urban ecological environment including air quality using satellite imagery. *PLOS ONE*, 17(8), e0266759. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266759>
- Wei, Q., Abudureheman, M., Halike, A., Yao, K., Yao, L., Tang, H., & Tuheti, B. (2022). Temporal and spatial variation analysis of habitat quality on the PLUS-InVEST model for Ebinur Lake Basin, China. *Ecological Indicators*, 145, 109632. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109632>
- Xiao, J., Shen, Y., Tateishi, R., & Bayaer, W. (2006). Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 27(12), 2411–2422. <https://doi.org/10.1080/01431160600554363>
- Мижиддорж, Р. (2009). Аяндаа цэгцрэх тогтолцоо, түүний эргэн тойронд. Нацагдорж, Л., Сарантуяа, Г., & Мөнхбат, Б. (2024). Монгол орны уур амьсгалын нэн шинэхэн өөрчлөлт: Ган, зуд. “АДМОН ПРИНТ” ХХК.



