

Estimation of forest above ground biomass using Sentinel-1 data

Tsolmon Altanchimeg^{1,*}, Amarsaikhan Damdinsuren¹

¹*Division of GIS and Remote Sensing, Institute of Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia*

*Corresponding author email: tsolmon_a@mas.ac.mn

<https://orcid.org/0000-0002-0116-4862>

Received: 30 September 2023 / Accepted: 25 December 2023 / published online: 28 December 2023

ABSTRACT

Estimation of above ground biomass (ABG) is important for sustainable forest management and climate change mitigation. Traditional methods for estimating above ground biomass rely on data collected from field measurements, which is spatially limited and also very expensive. At present, remotely sensed (RS) datasets are widely used for forest biomass assessment. The main aim of this research is to estimate and then generate a spatial distribution map of the above ground biomass of forested sites using radio detection and ranging (RADAR) data derived from satellite. The specific objectives are: estimate i) the biomass of forest land and ii) AGB using vegetation indices and Sentinel-1 satellite data recorded in the C-band with 5.55 cm wavelength, and iii) conduct a comparative study of principal component analysis (PCA) and random forest (RF) methods. As a tested site, the area around Khangal soum of Bulgan province was selected. In the study, the RF method showed good results, and for Level 1 Ground Range Detected (GRD) data coefficient of determination $R^2=0.823$, root mean square error RMSE=0.116 t ha⁻¹, while for Level 1 Single Look Complex (SLC) data $R^2=0.815$, RMSE=0.105 t ha⁻¹. Overall, the research indicated that it is possible to determine the AGB of forests in the temperate zone of Mongolia using RADAR satellite data.

Keywords: Above Ground Biomass (AGB), Random Forest (RF), Principal Component Analysis (PCA), Vegetation Index (VI)

Sentinel-1 дагуулын мэдээ ашиглан ойн газрын дээрх биомассыг тооцоолох нь

Цолмон Алтанчимэг^{1,*}, Амарсайхан Дамдинсүрэн¹

¹Газарзүйн мэдээллийн систем, зайнаас тандан судлалын салбар, Газарзүй, Геоэкологийн хүрээлэн, Шинжлэх Ухааны Академи, Улаанбаатар, Монгол

*Холбоо барих зохиогчийн цахим хаяг: tsolmon_a@mas.ac.mn

<https://orcid.org/0000-0002-0116-4862>

Хүлээн авсан: 2023 оны 09 сарын 30 өдөр / Зөвшөөрөгдсөн: 2023 оны 12 сарын 25 өдөр /

Нийтлэгдсэн: 2023 оны 12 сарын 28 өдөр

ХУРААНГУЙ

Газрын дээрх биомассыг тооцоолох нь ойн тогтвортой менежмент болон уур амьсгалын өөрчлөлтийг бууруулахад чухал үүрэгтэй. Газрын дээрх биомассыг тооцох уламжлалт аргууд нь хээрийн хэмжилтээр цуглуулсан өгөгдлийг ашиглан үнэлгээ хийх зарчимд тулгуурлах бөгөөд энэ нь орон зайн хувьд хязгаарлагдмал, өртөг өндөртэй юм. Орчин үед зайнаас тандсан мэдээг боловсруулан ойн биомассын үнэлгээнд ихээхэн ашиглаж байна. Энэхүү судалгааны ажил нь ойн газрын дээрх биомассыг сүүлийн үеийн радарын хиймэл дагуулын мэдээ ашиглан тооцоолж, улмаар зураглах үндсэн зорилготой. Тус зорилгын хүрээнд i) ойн газрын дээрх биомассыг тооцох, ii) Sentinel-1 дагуулын 5.55 см урттай радарын C-сүвгийн мужид бүртгэгдсэн мэдээ болон ургамлын индексүүдийг ашиглан газрын дээрх биомассыг тооцоолох, iii) гол компонентын шинжилгээ болон санамсаргүй форестын аргыг харьцуулан судлах гэсэн зорилтуудыг дэвшүүлсэн. Судалгааны талбайгаар Булган аймгийн Хангал сум орчмын талбайг сонгон авсан. Судалгааны үр дүнгээс харахад санамсаргүй форестын арга сайн үр дүнг үзүүлж байсан бөгөөд Level 1 Ground Range Detected (GRD) мэдээний хувьд детерминацийн коэффициент (R^2)=0.823, дундаж квадрат алдаа (RMSE)=0.116 тн га⁻¹ байсан бол Level 1 Single Look Complex (SLC) мэдээний хувьд R^2 =0.815, RMSE=0.105 тн га⁻¹ байлаа. Энэхүү судалгаа нь Монгол орны сэрүүн бүсийн ойн газрын дээрх биомассыг радарын мэдээ ашиглан тодорхойлох боломжтой гэдгийг баталж байна.

Түлхүүр үгс: Газрын дээрх биомасс (ABG), Санамсаргүй форестын арга (RF), Гол компонентын шинжилгээ (PCA), Ургамлын индекс (VI)

1. ОРШИЛ

Ойн экосистем нь фотосинтезийн явцад нүүрстөрөгчийг их хэмжээгээр шингээж, биомасс хэлбэрээр нөөцөлж байдаг [1, 2]. Ойн мод олон арван жилийн турш их хэмжээний нүүрстөрөгчийг хадгалах бөгөөд уур амьсгалын өөрчлөлтийн бодлогод чухал үүрэг гүйцэтгэдэг [3].

Газрын дээрх биомасс (ABG) нь ойн нийт биомассын 80 орчим хувийг эзэлдэг ба ойн төлөв байдлыг илэрхийлэх гол үзүүлэлт юм [4, 5].

Манай орны ой нь Сибирийн их тайга, Төв Азийн хээр, цөлийн заагт эх газрын эрс тэс уур амьсгалын нөхцөлд Азийн гурван томоохон усан хагалбарыг даган

ургадаг бөгөөд экологийн таатай орчныг бүрдүүлэхэд чухал үүрэг гүйцэтгэнэ [6].

Газрын дээрх биомассыг тооцох уламжлалт аргууд нь хээрийн хэмжилт дээр тулгуурлан дээж цуглуулах аргад үндэслэж, үнэн зөв үр дүнг өгдөг боловч, орон зайн хувьд хязгаарлагдмал, цаг хугацаа их шаарддаг, зардал ихтэйгээс гадна, хөдөлмөр их шаарддаг [7].

Монгол орны газрын дээрх биомассыг тооцоход хиймэл дагуулын мэдээ ашиглан Ренчин нар [8] JERS-1 SAR хиймэл дагуулын мэдээ ашиглан ойн биомасс тооцох, Загдаа нар [9] Сэлэнгэ аймаг дахь ойн биомассын мониторинг, Норовсүрэн нар [10] Хиймэл дагуулын мэдээ ашиглан ойн биомасс хамрах хүрээг тооцох, Алтанчимэг нар [11] Булган аймгийн биомасс тооцох аргачлал, зэрэг судалгаануудыг тус тус хийсэн байна.

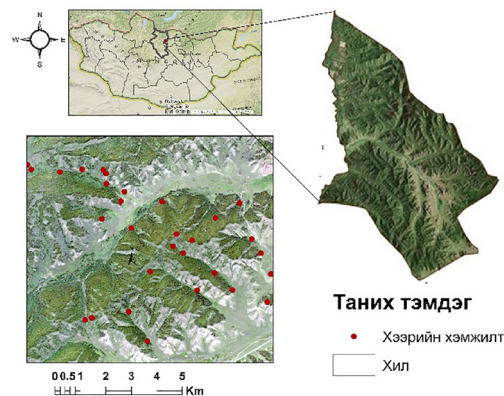
Энэхүү судалгааны ажлын үндсэн зорилго нь ойн газрын дээрх биомассыг радарын мэдээ ашиглан тооцоолж, улмаар урьдчилан таамаглах загвар болон орон зайн тархалтын зураглалыг боловсруулах зорилготой. Тус зорилгын хүрээнд i) ойн газрын дээрх биомассыг тооцох, ii) Sentinel-1 дагуулын 5.55 см урттай радарын C-сувгийн мужид бүртгэгдсэн мэдээ болон ургамлын индекссүүдийг ашиглан газрын дээрх биомассыг тооцоолох, iii) гол компонентын шинжилгээ болон санамсаргүй форестын аргыг харьцуулан судлах гэсэн зорилтуудыг дэвшүүлсэн болно.

2. СУДАЛГААНЫ ТАЛБАЙ

Судалгааны талбайгаар Булган аймгийн Хангал сум орчмын нутаг дэвсгэрийг сонгосон (Зураг 1). Судалгааны талбай нь уулын ойт хээрийн бүсэд хамаарах бөгөөд Хангайн уулын ойн эко бүсэд багтана [12]. Нийт 1600 км² талбайтай, далайн түвшнээс дээш (д.т.д) 1260 м-1570 м өргөгдсөн, эх

газрын эрс тэс уур амьсгалтай. Агаарын температур нь зундаа +38°C, өвлийн улиралд -49°C хүртэл хэлбэлздэг. Жилийн дундаж температур -2.4°C бөгөөд хур тунадас 200 мм- 350 мм хүртэл хэлбэлздэг.

Судалгааны талбайд шилмүүст модноос Сибирь шинэс (*Larix-Sibirica* Ledeb.) голлон ургах бөгөөд энэ нь нас гүйцсэн үедээ 24-26м дундаж өндөртэй, 40м хүртэл өндөр ургадаг [13]. Мөн дараах 5 зүйлийн мод ургана: Хавтага навчит хус (*Betula platy-phylla* Sukaczev.), Сибирь нарс буюу хус (*Pinus sibirica* Du Tour.), Тарваган хайлаас (*Ulmus pumila* L.), улиангар (*Populus tremula* L.), Сибирь гацуур (*Picea obovata* Ledeb.).



Зураг 1. Судалгааны талбай.

3. АШИГЛАСАН МЭДЭЭ

Судалгааны 117 км² талбайд дээж авах 30 талбайг тодорхойлж, модны цээжний өндрийн диаметр (ЦӨД) буюу (D)-г газрын гадаргаас дээш 1.3 м өндөрт хэмжилт хийсэн. Модны өндөр (H)-ийг vertex багажаар хэмжиж, хөрсний зүсэлтийг дээж талбай бүрийн 6 м-ийн радиустай тойрогт хөрсний дээж авдаг өрмөөр хийв. Газрын хэмжилтийн өгөгдлийн статистик үзүүлэлтүүдийг Хүснэгт 1-г үзүүлэв.

Хүснэгт 1. Газрын хэмжилтийн статистик үзүүлэлтүүд

Үзүүлэлт	Дундаж±SE	Далайц
Диаметр (см)	15±1.5	2.18-23.7
Өндөр (м)	21±0.58	1.5-35
Ишний эзэлхүүн (м³)	0.3270±0.1630	0.0003-0.994
Иш (кг)	123.15±0.952	0.209-148.992
Мөчир (кг)	5.8±0.739	0.129-53.992
Навч (кг)	29±0.131	0.196-275.51
Нийт биомасс (кг)	157.95±165.43	0.405-313.34

Энэхүү судалгаанд Sentinel-1 дагуулын Level 1 Ground Range Detected (GRD) болон Level 1 Single Look Complex (SLC) бүтээгдэхүүнүүдийг ашигласан. Sentinel-1 хиймэл дагуул нь эх дэлхийг 693 км-ийн өндрөөс 20°-46° градусын тусгалын өнцгөөр, 5.405 GHz давтамжтай долгион ашиглан зурагладаг [14]. Тус хиймэл дагуул нь 4 түвшний бүтээгдэхүүнтэй: Raw Level-0 ямар нэг боловсруулалт хийгээгүй түүхий мэдээ, Level-1 SLC буюу SLC нь дотоод засал, полиномын тохирол болон тусгалын, азимутын боловсруулалтыг хийж гүйцэтгэсэн мэдээ, Level-1 GRD болон GRD нь дэлхийн эллипсоидын загварыг ашигласан, хажуугийн мужаар илэрхийлсэн мэдээллийг багтаасан бол Level-2 Ocean (OCN) нь далай судлалд зориулсан геофизикийн бүтээгдэхүүнээс бүрдэнэ [15].

4. СУДАЛГААНЫ АРГАЗҮЙ

Ойн газрын дээрх биомассыг тооцоолоход Алтанчимэг нар (2019) [16]-ын дэвшүүлсэн олон хувьсагчийн регрессийн загварыг ашиглав. Аллометрийн тэгшитгэлийн коэффициент бүр модны төрөл зүйлээс хамаарч өөр өөр байна.

$$\hat{Y} = \alpha D^{\beta} H^{\gamma} M^{\delta} \quad (1)$$

Үүнд: α , β , γ , δ -аллометрийн тэгшитгэлийн коэффициентууд.

Энэхүү судалгаанд, Sentinel-1 радарын хиймэл дагуулын босоо-босоо (VV), босоо-хөндлөн (VH) гэсэн туйлшралаар хүлээн авсан өгөгдлийг ашигласан бөгөөд орон зайн шийд нь 10 м болно. Тус судалгаанд Sentinel-1 дагуулын SLC болон GRD түвшний VV болон VH туйлшралын мэдээг ашиглан *Dual Polarization Radar Vegetation Index* болон *Dual Polarization SAR Vegetation Index*-үүдийг тооцсон (Хүснэгт 2). Хиймэл дагуулын өгөгдөлд дүн шинжилгээ хийхэд SNAP, ArcMap 10.8 программ хангамжуудыг ашиглав.

Судалгааны хүрээнд 30 дээж талбайд хээрийн хэмжилт хийсэн ба тус хэмжилтээс цуглуулсан мэдээг ашиглан томьёо (1)-ээр газрын дээрх биомассыг тооцоолсон.

Дүн шинжилгээнд гол компонентын шинжилгээ (ГКШ) болон санамсаргүй форест (RF) зэрэг алгоритмуудыг ашиглав.

ГКШ нь дүрсийн спектр тодролыг сайжруулах болон олон сувгийн өгөгдлийн хэмжээсийг багасгахад ашиглагдана [17]. ГКШ-д олон хэмжээст огторгуйд бие, биетэйгээ перпендикуляр гол компонентууд (ГК) гэж нэрлэгдэх шинэ тэнхлэгүүдийг тодорхойлох ба шинэ системд өгөгдлүүд хамгийн бага корреляцитай байна. Олон хэмжээст огторгуйд пиксел нь түүний суваг тус бүр дэх спектр тодролыг илтгэх векторын компонентуудаар дүрслэгдэх бөгөөд пикселүүдийн дундаж шинэ огторгуйд тодорхойлох шаардлагатай [18].

Санамсаргүй форестын арга нь орчин үеийн өндөр түвшингийн машин сургалтын арга бөгөөд ангиллын үндсэн нэгж нь шийдвэрийн мод байдаг. Уг мод нь анхдагч өгөгдлийн ижил төстэй байдал дээр үндэслэн нийт мэдээний шаталсан хэлбэрийн бүтцийг үүсгэдэг. Тус аргад мод бүрийн зангилаа цэг дээрх таамагласан үр дүнгүүдийн хамгийн олон тохиолдлыг тодорхойлон, тэдгээрийг нэгтгэх замаар эцсийн шийдвэрийг гаргана [19]. Энэхүү арга нь регрессийн болон ангиллын

аргын аль алинд нь ашиглагддаг бөгөөд их хэмжээний мэдээтэй ажиллахад илүү тохиромжтой байдаг [20].

Хүснэгт 2. Судалгаанд ашигласан Sentinel-1 дагуулын туйлшралууд болон ургамлын индекс

	Ургамлын индекс	Томьёо	Ургамлын индексийн нэршил	Гэлцэг
1	DPRVI_dB	$(4*\gamma_0VH)/(\gamma_0VH+\gamma_0VV)$	Dual Polarization Radar Vegetation Index	[21]
2	DPSVI_dB	$(\gamma_0VH+\gamma_0VV)/\gamma_0VV$	Dual Polarization SAR Vegetation Index	[22]
3	Polarization	VH	Vertical transmit-horizontal channel	
4	Polarization	VV	Vertical transmit-vertical channel	

Судалгааны үр дүнгүүдийг шалгахын тулд детерминацийн коэффициент (R^2) болон дундаж квадрат алдаа (RMSE) ашигласан ба тэдгээрийг томьёо (2)-(3)-оор тооцооллоо.

R^2 –детерминацийн коэффициент [23]:

$$R^2 = \left(\frac{1}{n-1} - \frac{\sum(X - \mu_x)(Y - \mu_y)^2}{\sigma_x - \sigma_y} \right) \quad (2)$$

RMSE- дундаж квадрат алдаа [23]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}} \quad (3)$$

5. СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Sentinel-1 хиймэл дагуулын мэдээ нь үнэ төлбөргүйгээс гадна, орон зайн болон цаг хугацааны нарийвчлал өндөртэй [24]. Тандан судлалын технологийг ашиглан

спектрийн янз бүрийн мужуудад хүлээн авсан сувгуудыг олон янзын аргаар өөр хооронд нь нийлүүлэн, төрөл бүрийн ургамлын индексүүдийг статистик загваруудын хамт хэрэглэн урьдчилан таамаглагч хувьсагч болгон ашиглаж байна.

Тус судалгаанд Sentinel-1 дагуулын Level 1 GRD болон Level 1 SLC бүтээгдэхүүнүүдийг ашиглан ГКШ болон RF зэрэг алгоритмуудаар дүн шинжилгээг хийж гүйцэтгэв.

Бидний судалгааны хүрээнд, Sentinel-1 хиймэл дагуулын SLC болон GRD түвшний VV болон VH туйлшралын мэдээг ашиглан тооцоолсон индексүүдийг ГКШ-ний аргаар боловсруулан, үр дүнд шинжилгээ хийлээ. Гарсан үр дүнгээс харахад, нийт таван ГК-ийн тэнхлэгүүд үүссэн бөгөөд эхний гурван ГК-ууд газрын дээрх биомассын мэдээллийн ихэнх хувийг буюу нийт мэдээллийн 98-аас илүү хувийг агуулж байв (Хүснэгт 3, Хүснэгт 4). Эхний гол компонент (F1) нь GRD-ийн хувьд нийт дисперсийн 57.873%-ийг агуулж байгаа бол SLC-ийн хувьд нийт дисперсийн 57.309%-ийг агуулж байна. Хоёрдахь гол компонент (F2) нь GRD-ийн хувьд нийт дисперсийн 28.429%-ийг агуулж байгаа бол SLC-ийн хувьд нийт дисперсийн 24.417%-ийг агуулж байна. Үлдсэн компонентуудад агуулагдах дисперсийн хэмжээ GRD мэдээний хувьд бага байгаа бол (F3=13.310%, F4=0.343%, F5=0.045%) SLC мэдээний хувьд (F3=16.604%, F4=1.484%, F5=0.185) арай илүү байна.

Хүснэгт 3. GRD мэдээний хувийн утга, дисперс, хуримтлал дисперсийн утгууд.

	F1	F2	F3	F4	F5
Хувийн утга	2.894	1.421	0.666	0.017	0.002
Дисперс (%)	57.873	28.429	13.310	0.343	0.045
Хуримтлал (%)	57.873	86.302	99.612	99.955	100.000

Хүснэгт 4. SLC мэдээний хувийн утга, дисперс, хуримтлал дисперсийн утгууд.

	F1	F2	F3	F4	F5
Хувийн утга	2.865	1.221	0.830	0.074	0.009
Дисперс (%)	57.309	24.417	16.604	1.484	0.185
Хуримтлал (%)	57.309	81.727	98.331	99.815	100.000

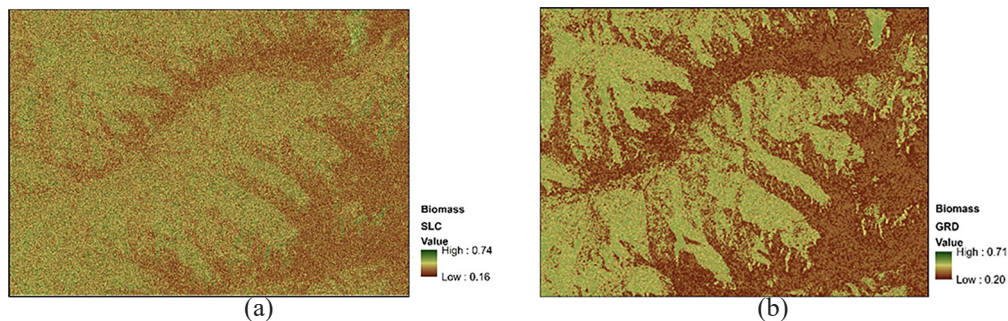
Сүүлийн үед, төрөл бүрийн спектр болон оронзайн шийдтэй зайнаас тандсан өгөгдлийг боловсруулан сэдэвчилсэн үр дүнг гарган авахад уламжлалт ангиллын аргуудаас гадна, өндөр түвшингийн машин сургалтын аргууд ашиглагдаж байна.

Энэхүү судалгааны хүрээнд, R программ дээр RF алгоритмыг боловсруулан Sentinel-1 хиймэл дагуулын мэдээг ашиглан газрын биомассыг үнэллээ. Үр дүнгээс харахад нийт 500 шийдвэрийн мод үүсгэж тооцоолол хийсэн ба алдааны квадратуудын дундаж 0.052, вариаци 14.94% байна. Боловсруулсан загварт чанарын үнэлгээ хийхийн тулд, статистикийн хэмжигдэхүүнүүд болох детерминацийн коэффициент (R^2) болон дундаж квадрат алдаа (RMSE)-г ашигласан. RF загварыг ашиглан тооцоолол хийсэн дүнгээс харахад, Level 1 GRD мэдээний хувьд $R^2=0.823$, $RMSE=0.116$ тн га⁻¹ байсан бол Level 1 SLC

мэдээний хувьд $R^2=0.815$, $RMSE=0.105$ тн га⁻¹ байв. Судалгаанаас гарсан үр дүнг Зураг 2-д харуулав. Дээрх 2 ангиллын үр дүнгээс харахад, бидний судалгаанд ашигласан RF алгоритм өндөр үр дүнг үзүүлж байх бөгөөд ангиллын нарийвчлал өндөр байна.

Газрын дээд биомассын бидний судалгааны үр дүн нь дээр дурдсан Ренчин нар [8]-ын JERS-1 SAR хиймэл дагуулын мэдээ ашиглан ойн биомасс тооцох, Загдаа нар [9]-ын Сэлэнгэ аймаг дахь ойн биомассын мониторинг, Норовсүрэн нар [10]-ын Хиймэл дагуулын мэдээ ашиглан ойн биомасс хамрах хүрээг тооцох, Алтанчимэг нар [11]-ын Булган аймгийн биомасс тооцох аргачлал зэрэг олон судалгаатай нийцэж байсан.

Ойн нөөц нь модны өндөр, диаметр хоёртой шууд хамааралтай бөгөөд ой судлалын олон асуудлыг боловсруулахад чухал үүрэгтэй. Ойн нөөцийг зохистой ашиглах, экосистемийн тэнцвэрт байдлыг хангах, хүлэмжийн хийг бууруулахад ойн биомассын тооцоо, мэдээлэл чухал нөлөөтэй. Энэхүү судалгаанд, Алтанчимэг нар [16]-ын боловсруулсан олон хувьсагчтай загвар болох $\hat{Y} = \alpha D^\beta H^\gamma M^\delta$ тэгшитгэлийг ашиглан Сибирь шинэс (*L. sibirica*) модны газрын дээрх биомассыг тодорхойлсон бөгөөд дүн шинжилгээнд ГКШ, санамсаргүй форестын гэсэн аргуудыг ашигласан.



Зураг 2. RF алгоритмаар тооцсон үр дүн

(a) SLC бүтээгдэхүүнээс тооцсон газрын дээрх биомасс (b) GRD бүтээгдэхүүнээс тооцсон газрын дээрх биомасс

ГКШ нь хувьсагчдын хоорондын хамаарлыг багасгаж, тухайн загварт ашиглагдаж байгаа хувьсагчуудын хэмжээсийг багасгана [17]. Санамсаргүй форестын алгоритмын хамгийн чухал шинж чанаруудын нэг нь регрессийн хувьд тасралтгүй хувьсагч, ангиллын хувьд тодорхой шийдтэй хувьсагчдыг агуулсан өгөгдлийн багцыг боловсруулж чаддаг [25, 26]. Энэ нь ангиллын хувьд илүү сайн үр дүн өгдөг. Бидний судалгаанд, ГКШ-ний аргыг ашиглан индексүүдийг шахаж, 5 өөр янзын хэмжээст шинэ өгөгдлүүдийг тодорхойлсон бөгөөд санамсаргүй форестын аргыг ашиглан ангиллыг хийхэд нарийвчлал нь өндөр байлаа. Ихэнх судлаачдын хувьд, янз бүрийн индексүүдийг, аль эсвэл сувгуудын хоршлолыг биомассын үнэлгээнд ашигласан байдаг. Харин ГКШ ашиглан өгөгдлийг шахсан, аль эсвэл хэмжээсийг багасгасан жишээ төдийлэн элбэг биш байдаг байна [27].

5. ДҮГНЭЛТ

Судалгааны хүрээнд, Хангал сум орчмын ойн талбайд газрын дээрх биомассыг Алтанчимэг нар [16]-ын олон хувьсагчтай тэгшитгэлээр тооцож, Sentinel-1 дагуулын Level 1 GRD ба Level 1 SLC радарын мэдээг тус тус ашиглан, ГКШ болон орчин үеийн машин сургалттай аргуудын нэг болох санамсаргүй форестын алгоритмыг ашиглав. Алгоритмуудыг харьцуулах нь олон төрлийн бүс нутагт ойн биомассын зайнаас тандан судлах тооцооны нарийвчлалыг нэмэгдүүлэхэд чухал үүрэгтэй. Радарын мэдээг ашиглан хээрийн судалгааны болон суурин боловсруулалтын нийлмэл аргагүйгээр ойн газрын дээрх биомассыг үнэлэн зураглав. Радарын 2 төрлийн ургамлын индекс болон VV, VH туйлшралын мэдээг ашиглан боловсруулалт шинжилгээ хийсэн. Үр дүнгээс харахад RF алгоритм өндөр

үр дүнтэй байсан ба Sentinel-1 дагуулын Level 1 GRD мэдээний хувьд ангиллын нарийвчлал өндөр байгаа бол Level 1 SLC мэдээний хувьд дундаж квадрат алдаа бага байна. Дүн шинжилгээнээс харахад, тандан судлахуйн мэдээг боловсруулах машин сургалттай аргуудын нэг болох санамсаргүй форестын арга нь ойн газрын дээрх биомассыг тодорхойлоход ихээхэн ач холбогдолтой байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1]. D. Ellison, C. E. Morris, B. Locatelli, D. Sheil, J. Cohen, D. Murdiyarso, V. Gutierrez, M. v. Noordwijk, I. F. Creed, J. Pokorny, D. Gaveau, D. V. Spracklen, A. B. T. Tobella, U. Ilstedt, A. J. Teuling, S. G. Gebrehiwot, D. C. Sands, B. Muys, B. Verbist, E. Springgay, Y. Sugandi and C. A. Sullivan, "Trees, forests and water: Cool insights for a hot world". *Global Environmental Change*, vol. 9. no. 43, pp. 51-61, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- [2]. T. Altanchimeg, A. Damdinsuren, B. Tseveen and B. Batdorj, "Analysis of Relations Between Aboveground Biomass and Vegetation Indices Derived from Sentinel-2 Satellite Data". *Journal of Institute of Mathematics and Digital Technology*, vol 4, pp. 94-100, 2022. <https://doi.org/10.5564/jimdt.v4i1.2666>
- [3]. M. O. N. H. Ravindranath, "Carbon Inventory Methods: Handbook for Greenhouse Gas Inventory, Carbon Mitigation and Roundwood Production Projects". Heidelberg, Berlin: Springer, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6547-7>
- [4]. L. Chen, C. Ren, B. Zhang, Z. Wang and Y. Xi, "Estimation of Forest Above-Ground Biomass by Geographically Weighted Regression and Machine

- Learning with Sentinel Imagery”. *Forests*, vol. 9, pp. 1-20, 2018. <https://doi.org/10.3390/f9100582>
- [5]. N. Georgopoulos, C. Sotiropoulos, A. Stefanidou and I. Z. Gitas, “Total Stem Biomass Estimation Using Sentinel-1 and -2 Data in a Dense Coniferous Forest of Complex Structure and Terrain”. *Forests*, vol. 13, pp. 1-18, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13122157>
- [6]. Ч. Болдбаатар, Ой, уур амьсгалын өөрчлөлт, Улаанбаатар: БОАЖЯ, ШУТИС, Ой модны сургалт судалгааны хүрээлэн, 2018.
- [7]. N. Georgopoulos, I. Z. Gitas, A. Stefanidou, L. Korhonen and D. Stavrakoudis, “Estimation of Individual Tree Stem Biomass in an Uneven-Aged Structured Coniferous Forest Using Multispectral LiDAR Data”. vol. 13, p. 4827, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13234827>
- [8]. T. Renchin, R. Tateishi and J. T. S. Sumantyo, “A method to estimate forest biomass and its application to monitor Mongolian Taiga using JERS-1 SAR”. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, pp. 4971-4978, 2002. <https://doi.org/10.1080/01431160210133554>
- [9]. N. Zagdaa, T. Renchin and N. Davaa, “Monitoring of forest biomass in Selenge province”. *Proceedings of 27th Asian Conference on Remote Sensing*, Ulaanbaatar, 2006.
- [10]. B. Norovsuren, B. Tseveen, V. Batomunkuev and T. Renchin, “Estimation for forest biomass and coverage using Satellite data in small scale area, Mongolia”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, p. 320, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/320/1/012019>
- [11]. T. Altanchimeg, T. Renchin, B. Darkhijav, P. D. Maeyer, B. Tseveen and B. Norovsuren, “Biomass estimation methodology for forest in Bulgan province, Mongolia”. *Proceedings of 41st Asian conference on Remote sensing*, Deqing, 2020.
- [12]. D. Chimednyam, D. Chultem, T. Gonchig, T. Jargalsaikhan and K. Battuvshin, “Mongolia’s forestry -rehabilitation of plants”. *Forest Day in Mongolia, Ulaanbaatar*, 2021.
- [13]. Л. Цэрэндэжид “Сибирь шинэс (*Larix sibirica* ledeb)-ний бичил ургамлыг гаргах, бойжуулахад өсөлт in vitro орчинд идэвхжүүлэгчийн нөлөө”. *ХАА-н шинжлэх ухаан сэтгүүл*, 26, хх. 108-116, 2019.
- [14]. A. Damdinsuren, N. Erdenebaatar, J. Enkhtuya, M.-E. Altangerel, R. Tovvudorj ба Т. Gurjav, “Interpretation of Scattering Characteristics of Radar L and C-Channel Data”. *Journal of Institute of Mathematics and Digital Technology*, Vol. 4, pp. 85-93, 2023. <https://doi.org/10.5564/jimdt.v4i1.2665>
- [15]. ESA, “Sentinel-1 SAR User Guide”. ESA, 2016.
- [16]. Т. Altanchimeg, Т. Renchin, P. D. Maeyer, E. Natsagdorj, B. Tseveen and N. Bayanmunkh, “Estimation methodology for forest biomass in Mongolia using remote sensing”. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 7-12, 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W3-7-2019>
- [17]. Д. Амарсайхан, Радарын тандан судлал, радарын мэдээнд дүн шинжилгээ хийх зарчмууд, Улаанбаатар: Эрдэм хэвлэл, 2013.
- [18]. P. Wallisch, . M. Lusignan, M. Benayoun, T. I. Baker, A. S. Dickey

- and N. G. Hatsopoulos, “Principal Components Analysis”. *Matlab for Neuroscientists*, pp. 183-192, 2009. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374551-4.00014-2>
- [19]. L. Breiman, “Random forest”. *Machine Learning*, б. 45, p. 5-32, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- [20]. S. Chakraborty, Bayesian Additive Regression Tree for Seemingly Unrelated Regression with Automatic Tree Selection, *Handbook of Statistics*, pp. 229-251, 2016. <https://doi.org/10.1016/bs.host.2016.07.007>
- [21]. Y. Kim and J. J. van Zyl, “A Time-Series Approach to Estimate Soil Moisture Using Polarimetric Radar Data”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, pp. 2519 - 2527, 2009. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2014944>
- [22]. D. Mandal, V. Kumar, D. Ratha, S. Dey, A. Bhattacharya, J. M. Lopez-Sanchez, H. McNairn and Y. S. Rao, “Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using sentinel-1 SAR data”. *Remote Sensing of Environment*, vol. 247, pp. 1954, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111954>
- [23]. J. J. Faraway, *Linear Models with R*, Taylor & Francis, 2014.
- [24]. X.P. Song, W. Huang, M. C. Hansen and P. Potapov, “An evaluation of Landsat, Sentinel-2, Sentinel-1 and MODIS data for crop type mapping”. *Science of Remote Sensing*, vol. 3, pp. 10018, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100018>
- [25]. T. K. Ho, “The random subspace method for constructing decision forests”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, pp. 832-844, 1998. <https://doi.org/10.1109/34.709601>
- [26]. Y. Amit and D. Geman, “Shape Quantization and Recognition with Randomized Trees”. *Neural Computation*, vol. 9, pp. 1545-1588, 1997. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.7.1545>
- [27]. A. Tariqa, M. R. Javed, M. I. Majeeda, H. Nawaza, N. Rashidc, R. M. Pallaresd, A. Ijazb, N. Hudaa, H. Tahseen, A. Namana, S. Aziza, R. Tariqa and R. M. Pallaresd, “Characterization of *Aspergillus niger* DNA by Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS) with Principal Component Analysis (PCA) and Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) with Application for the Production of Cellulase”. *Analytical Letters*, pp. 1-14, 2023. <https://doi.org/10.1080/00032719.2023.2241938>