NATIONAL UNIVERSITY OF MONGOLIA
SCHOOL OF ART AND SCIENCES
DEPARTMENT OF GEOGRAPHY

Geographical Issues

Газарзүйн асуудлууд

Volume 26 (01) *ISSN: 2312-8534* *2026*

Ulaanbaatar

Determination of Annual Ablation of the Doloonnuur Glacier on Munkhkhairkhan Mountain, Mongolian Altai, Using a Degree-Day Model

Bilguun Tsogoo [1,2], Purevdulam Yondonrentsen [1], Temuujin Khurelbaatar [1], Dashtseren Avirmed [1], Batsuren Dorjsuren [2*], Dolgormaa Batbold [2]

[1] *Division of Permafrost Research, Institute of Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 15170, Mongolia*

[2] *Department of Environment and Forest Engineering, School of Engineering and Technology, NationalUniversity of Mongolia, Ulaanbaatar 14201, Mongolia*

*Corresponding author: batsuren@num.edu.mn

Received: 2025.10.27
Revised: 2025.12.26
Accepted: 2025.12.31

Abstract

Mongolia is among the ten countries most vulnerable to global warming and climate change. Mid-term observations from western Mongolia indicate that the mean annual air temperature increased by 2.08 °C between 1940 and 2017, exerting a strong influence on glacier melt and area shrinkage in high mountain regions. This study estimates the annual melt of the Doloon Nuur Glacier, located on Munkhkhairkhan Mountain in the Mongolian Altai, using a degree-day model (DDM) and evaluates the results against in situ stake measurements. Air temperature data recorded by an automatic weather station between 15 June 2023 and 15 June 2024, together with ablation stake measurements installed on 15 June 2023, were used in the analysis. The cumulative positive degree days (PDD) amounted to 844.8 °C·day over the study period. Applying a degree-day factor of 6.0 mm w.e. $°C^{-1}$ day^{-1}, the calculated annual melt reached 5.06 m in the lower glacier zone, 4.2 m in the middle zone, and 3.1 m in the upper zone, yielding a glacier-wide mean melt of 4.1 m. The modeled melt shows good agreement with the observed mean stake ablation of 3.6 m, with a difference of 0.5 m, supporting the reliability of the degree-day approach in this region. Between 2023 and 2024, the glacier ablation area decreased by 5.3 ha (≈5%), corresponding to an estimated ice volume loss of 2.18×10^5 m^3, indicating a clear and measurable impact of climate change on glaciers in the Mongolian Altai. These results demonstrate that temperature-based modeling provides a robust framework for assessing glacier mass loss in Mongolia and offers a valuable data foundation for long-term glacier mass-balance monitoring and climate-change impact assessments in data-scarce mountain regions.

Keywords: *Glacier melt, Degree-Day Model, Doloonnuur Glacier, Munkhkhairkhan Mountain, mass loss*

Монгол Алтайн Мөнххайрхан уулын Долооннуурын мөсөн голын жилийн алдралыг Хэм-өдрийн загвар ашиглан тодорхойлох нь

©Цогоо Билгүүн [1,2], Ёндонрэнцэн Пүрэвдулам [1], Хүрэлбаатар Тэмүүжин [1], Авирмэд Дашцэрэн [1], Доржсүрэн Батсүрэн [2*], Батболд Долгормаа [2]

[1] *Цэвдэг судлалын салбар, Газарзүй, Геоэкологийн хүрээлэн, Шинжлэх Ухааны Академи, Улаанбаатар 15170, Монгол Улс*

[2] *Хүрээлэн буй орчин, ойн инженерчлэлийн тэнхим, Инженер Технологийн Сургууль, МонголУлсын Их Сургууль, Улаанбаатар 14201, Монгол Улс*

*Харилцагч зохиогч: batsuren@num.edu.mn

Хүлээн авсан: 2025.10.27
Засварласан: 2025.12.26
Зөвшөөрөгдсөн: 2025.12.31

Хураангуй

Монгол орон нь дэлхийн дулаарал, уур амьсгалын өөрчлөлтөд хамгийн эмзэг өртөмхий 10 орны нэг бөгөөд баруун бүс нутгийн дунд хугацааны ажиглалтаар 1940-2017 оны хооронд агаарын дундаж температур 2.08°C-аар нэмэгдсэн нь уулын мөстлөгийн хайлалт, талбайн агшилтад хүчтэй нөлөөлж байна. Энэ судалгаанд Монгол Алтайн нурууны Мөнххайрхан уулын Долооннуурын мөсөн голын жилийн хайлалтын хэмжээг Хэм-өдрийн загварын аргаар тооцож, бодит талбайн хэмжилтийн үр дүнтэй харьцуулан үнэлсэн. 2023 оны 6 дугаар сарын 15-наас 2024 оны 6 дугаар сарын 15-ны хооронд автомат цаг уурын станцад бүртгэгдсэн агаарын температурын мэдээ болон 2023 оны 6 дугаар сарын 15-нд мөсөн голд суулгасан хэмжилтийн шонгийн өгөгдлийг ашиглав. Эерэг температуртай өдрийн нийлбэр нийт 844.8°C·өдөр гарсан ба мөсний хайлалтын коэффициент (DDF = 6.0 мм усны экв/°C·өдөр) ашиглан тооцоход мөстлөгийн доод хэсэгт 5.06 м, гол хэсэгт 4.2 м, дээд хэсэгт 3.1 м буюу дундаж нь 4.1 м хайлсан байна. Загвараар тооцсон үр дүн нь бодит шонгийн хэмжилтээр тогтоогдсон дундаж хайлалт (3.6 м)-тай 0.5 метрийн зөрүүтэй буюу сайн тохирц үзүүлсэн нь хэм-өдрийн загварын найдвартай байдлыг бататгаж байна. 2023-2024 оны хооронд мөстлөгийн алдралын бүсийн талбай 5.3 га (≈5%)–аар буурч, нийт 2.18 × 10^5 $м^3$ мөс алдагдсан нь тус бүс нутагт уур амьсгалын өөрчлөлт бодит хэмжээнд нөлөөлж байгааг илтгэнэ. Энэхүү үр дүн нь Монгол орны мөстлөгийн масс алдралын өөрчлөлтийг температурын өгөгдөлд тулгуурлан үнэлэх боломжийг нотолж, цаашдын мөстлөгийн масс балансын мониторинг болон уур амьсгалын өөрчлөлтийн нөлөөллийн судалгаанд чухал мэдээллийн суурь болж байна.

***Түлхүүр үгс*:** *Хэм өдрийн загвар, Нэмэх хэмтэй өдрүүд, Долооннуурын мөстлөг, Мөнххайрхан уул, мөстлөгийн алдрал*

©Зохиогчийн оруулсан хувь нэмэр: **Ц.Билгүүн:** Онолын үндэслэл, аргазүй боловсруулалт, өгөгдөл боловсруулалт, үндсэн бичвэр, **Ё.Пүрэвдулам** болон **Х.Тэмүүжин**: Аргазүй боловсруулалт, өгөгдөл боловсруулалт, үндсэн бичвэр, **Б.Долгормаа** болон **Д.Батсүрэн**: Өгөгдөл боловсруулалт, бичвэрийн үндсэн засвар, **А.Дашцэрэн**: Онолын үндэслэл, үр дүнгийн хяналт.

2312-8534/© 2026 Зохиогчийн бүх эрх хуулиар хамгаалагдсан.

Оршил

Олон жил хуримтлагдсан хур цас, түүний хатуурсан массыг мөстлөг (Cuffey & Paterson, 2010) гэж нэрлэдэг. Дэлхийн гадаргын цэвэр усны нөөцийн 70 орчим хувь нь мөсөн бүрхүүл, уулын мөстлөг, мөсөн голд агуулагдаж байдаг (Yongjian et al., 2020). Мөстлөг нь цэвэр усны нөөцийн томоохон эх үүсвэр болохоос гадна бүс нутгийн хэмжээнд байгалийн усны эргэлт, экологийн тэнцвэрт байдалд чухал үүрэгтэй юм (Bahr et al., 1997; Bliss et al., 2014). Ялангуяа өндөр уулын экосистемд мөстлөг нь усны эргэлт, хөрсний чийгийн тэнцвэр болон ургамлын ургалтад эерэг нөлөөтэй байдаг тул тухайн бүс нутгийн экосистем баялаг, үйлчилгээ сайтай байдаг (Дашцэрэн, 2018). Мөн гадаргын усны чухал эх үүсвэр учир бүс нутгийн хүн амыг цэвэр усаар хангахад голлох үүрэгтэй (Bahr et al., 1997; Bliss et al., 2014). Дэлхийн жилийн дундаж агаарын температур 1880 оноос хойш 0.85°C-ээр нэмэгдсэн (Li et al., 2015; Дуламсүрэн, 2022) бөгөөд хагас хуурай, хуурай уур амьсгалтай Монгол орны хэмжээнд энэ өсөлт улам хурдацтай нэмэгдэх хандлагатай байна (Dorjsuren et al., 2018; Nandintsetseg et al., 2021; Дуламсүрэн, 2022; Enkhbold et al., 2024a; Dorjsuren et al., 2024).

Дэлхийн бүс нутаг бүрийг хамарч буй дулаарал, уур амьсгалын өөрчлөлтийн улмаас мөстлөг, мөсөн голууд жил ирэх тусам багассаар байгааг (Harrison et al., 2018; Huss et al., 2017; Milner et al., 2009; Vuille et al., 2018) олон судалгаануудад дурдсан байдаг. Өнгөрсөн зуунд уулын мөстлөг нь дэлхийн хуурай газрын зөвхөн 0.5 хувийг эзэлдэг байсан ч түүний хайлалт нь Гренланд, Антарктидийн мөсөн бүрхүүлийн хайлалтаас илүүтэйгээр далайн түвшин нэмэгдэхэд нөлөөлсөн байна (The GlaMBIE Team et al., 2025a). Мөн 2000-2023 оны хооронд мөстлөг жилд дунджаар 273 тэрбум тонн массаа алдсан нь дэлхийн далайн түвшин жил бүр ойролцоогоор 0.75 мм нэмэгдсэнтэй тэнцэж байна (The GlaMBIE Team et al., 2025b). Эдгээрээс үзвэл мөстлөг нь уур амьсгалын өөрчлөлтөд эмзэг мэдрэмтгий байгалийн бүрэлдэхүүн мөн бөгөөд түүний өөрчлөлтийг судлах нь уур амьсгалын өөрчлөлтийг тогтооход чухал үзүүлэлт болдог (Kamp et al., 2013; Demberel et al., 2023). Цаашлаад энэ төрлийн судалгаа нь байгаль орчин, экологи, эдийн засгийн хувьд ч чухал ач холбогдолтой.

Монгол орны гадаргын усны нийт нөөц 599 км^3/жил, үүнээс 83.5% нь нуурт, 5.8% голуудад, 3.6% буюу 19.4 км^3 нь мөстлөг, мөсөн голд агуулагдаж байдаг (Даваа ба бусад., 2012; Kamp et al., 2013). Манай орны усны нөөцийн тархалт бүс нутаг тус бүрд харилцан адилгүй бөгөөд Монгол Алтайн нуруунд орших мөстлөг, мөсөн голууд нь нийт цэнгэг усны нөөцийн 3 орчим хувийг бүрдүүлдэг (Orkhonselenge & Harbor, 2018; Bantcev et al., 2019; Tsedevdorj, 2021).

Монгол Алтайн нуруу нь Энэтхэг-Евразийн хавтангийн шахалтын нөлөөгөөр баруун хойноос зүүн урагш чиглэн сунаж тогтсон (Khukhuudei et al., 2020; Altanbold et al., 2025; Enkhbold et al., 2025) нь дундад өргөргийн баруун зүгийн салхины урсгалын дагуу оршдог онцлогтой. Энэ онцлогоос хамаарч уур амьсгалын болон мөстлөгийн динамик өөрчлөлт тод илэрдэг бүс нутаг юм (Walther et al., 2017; Enkhbold et al., 2024b; Tsedevdorj et al., 2025). Монгол Алтайн нурууны уулсын системд уур амьсгалын өөрчлөлт нөлөөлж, мөстлөгийн эзлэх талбай 1940-2002 оны хооронд 30 гаруй хувиар багасаж, мөнх цас, мөс, мөсөн голын хил дээшилж, мөстлөгөөс чөлөөлөгдсөн хуурай газрын хэмжээ нэмэгдэж, цаашид улам бүр эрчимжих хандлагатай (Даваа ба бусад., 2012; Tsedevdorj, 2021; Kamp et al., 2022; Khalzan et al., 2022) байгааг тогтмол судалж байна. Сүүлийн үеийн судалгаанаас үзэхэд 334.0 ± 42.3 км^2 талбайг хамарсан мөстлөг, мөсөн голууд (Pan et al., 2019)-ын хэмжээг нарийвчлан тооцсон бөгөөд үүнээс хойших богино хугацаанд Монгол Алтайн уулархаг бүсэд (Walther et al., 2017; Tsedevdorj, 2021; Kamp et al., 2022; Khalzan et al., 2022; Demberel et al., 2023) энэ талбайн хэмжээ мэдэгдэхүйц эрчимтэй буурсаар байгааг тогтоожээ.

Монгол Алтайн нуруу, түүний салбар уулс дахь мөстлөгийн төвүүдийн нэг нь нутгийн өмнө хэсэгт орших Мөнххайрхан уул юм. Мөнххайрхан уулын мөстлөг нь талбайн хэмжээгээр дундавтар хэмжээний мөстлөгт хамаарах ба баруун хойд хэсгийг Долооннуурын массив, төв хэсгийг Шуурхайн массив, өмнөд хэсгийг Хөх нуурын массив (Отгонбаяр, 2012; Filandysheva et

al., 2022) гэж нэрлэдэг. Энэ уулын мөстлөгийн өөрчлөлтийн талаарх судалгаануудыг авч үзвэл, 1970 онд тус уулын 3 массивыг хамарсан 24 мөсөн гол нийт 48.13 км^2 талбайтай байсан бол 2008 онд 26.57 км^2 талбайг хамарсан 17 мөсөн гол болж буурсан (Filandysheva et al., 2022; Plyusnin et al., 2013). Мөн Ganyushkin et al. (2022); Krumwiede et al. (2014) зэрэг судалгаанд 27.4 км^2, 26.86 км^2 талбайтай гэж тооцоолсон байдаг. Demberel et al. (2023) судалгаанд тус уулын мөстлөгийн талбай 1970-2008 оны хооронд 44.7%-иар буурсан, зарим жижиг мөстлөг бүрэн хайлсан гэдгийг онцолсон байна.

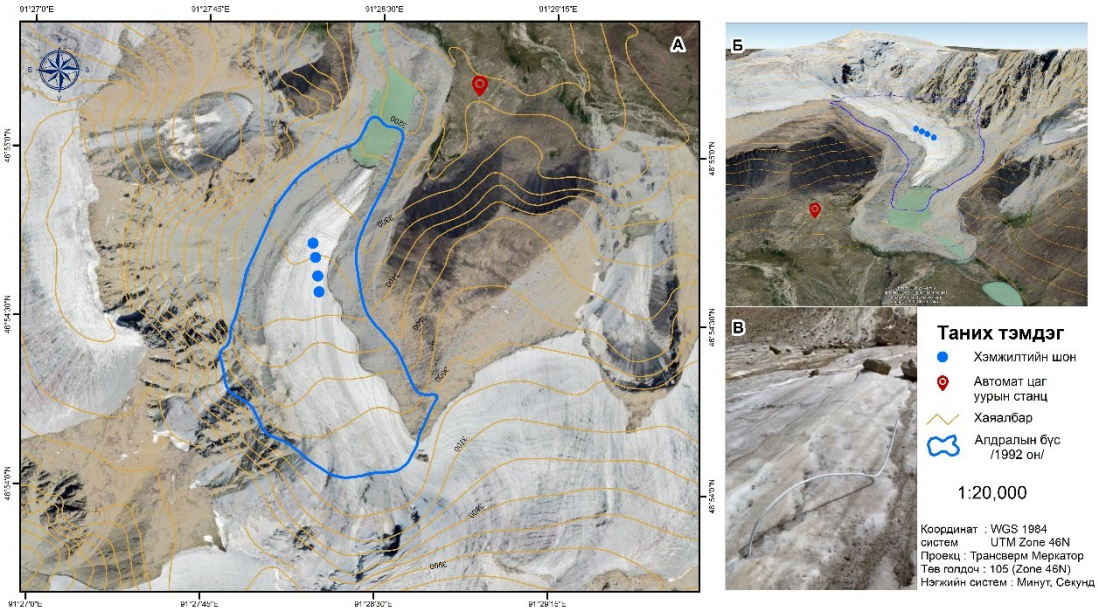
Мөстлөг, мөсөн голууд нь ундны усны эх үүсвэрээр арвин тул нутгийн иргэдийн усны хэрэгцээ хангагдах таатай орчин бүрдүүлдэг (Alerstam et al., 2001; Jargalsaikhan et al., 2025). Энэ эх үүсвэрийг дагаж хагас хуурай, хуурай уур амьсгалтай Монгол орны уулархаг бүс нутагт малчдын усны хэрэгцээг болон биологийн олон янз байдлын ургамал, амьтан нутагших таатай орчин бүрдсэн байдаг.

Мөстлөгийн хайлалт нь усны нөөцөд нөлөөлөх гол хүчин зүйлсийн нэг болоод байгаа тул мөстлөг, мөсөн голуудын өнөөгийн төлөв байдал, өөрчлөлт, хайлалт зэргийг зайлшгүй судлах шаардлагатай. Мөстлөгийн хайлалтын хэмжээ нь мөсөн гадаргын энергийн тэнцлээс хамаардаг (Tsedevdorj et al., 2025). Гэвч алслагдсан мөстлөгийн төвүүдэд энэхүү энергийн тэнцлийг бүрэн тодорхойлоход шаардлагатай (Gardner & Sharp, 2009) их хэмжээний өгөгдөл хомс, хээрийн хэмжилт судалгаа хийхэд хүндрэл бэрхшээл их байдаг

Иймд энэхүү судалгааны ажлаар Мөнххайрхан уулын Долооннуурын мөсөн голын хайлалтын хэмжээг Хэм-өдрийн загварын (Degree Day Model) аргаар тооцож, талбайн хэмжилттэй харьцуулах замаар загварын таарц, үнэлгээг хийхэд оршино.

Судалгааны талбай

Мөнххайрхан уул нь Баян-Өлгий аймгийн Булган, Ховд аймгийн Мөнххайрхан сумын хилийн дагуу баруун хойноос зүүн урагшаа үргэлжлэх 150 км урттай, өргөн нь 40-80 км хүрэх бөгөөд д.т.д 3500 - 4196 м хүртэл өргөгдсөн (Demberel et al., 2023) байдаг. Орой хяр нь хавтгай, бөмбөгөр хэлбэртэй, эртний тэгшрэлийн шаталсан гадаргатай, хавтгай оройн, хунхын, хунхын өлгүү, өлгүү, хунх хөндийн хэв шинжийн мөсөн голууд тархана (Demberel et al., 2023; Enkhbold et al., 2024b). Энэхүү судалгаанд Мөнххайрхан уулын 46° 56′ 095″-46° 45′ 45″ E, 90° 09′ 04″-90° 32′ 48″ N хэсгийн мөстлөгийн талбайгаас Долооннуурын хунх-хөндийн хэв шинжийн мөсөн голын алдралын бүсийг сонгон авсан (Зураг 1). Мөсөн голын доод хэсгээс 8 метрийн нам өндөрт, 700 метрийн зайтай буюу 3,254 м-ийн өндөрт Швейцарын хөгжлийн агентлагийн санхүүжилтээр ШУА-Газарзүй, геоэкологийн хүрээлэнгийн Цэвдэг судлалын салбарын хамт олон 2020 онд цаг уурын автомат станц суурилуулсан. Энэ станц нь агаарын температур, хур тунадас, чийгшилт, нарны цацраг, агаарын даралт болон салхины хурд, чиглэл зэргийг 15 минутын интервалтайгаар хэмждэг.



Зураг 1. А. Мөнххайрхан уулын судалгааны талбай Б. Судалгааны талбайн 3-н хэмжээст харагдац В. Алдралын бүсийн хэмжилтийн шонгийн байрлал

Судалгааны материал, аргазүй

Энэхүү судалгааны ажлыг аргазүйн хувьд үндсэн хоёр үе шаттайгаар хийж гүйцэтгэсэн. Нэгдүгээрт, Долооннуурын мөсөн голын алдралын бүс дэх хайлалтын хэмжээг тогтоохын тулд 1992 оны Ландсат хиймэл дагуулын зургаас алдралын бүсийг тодорхойлж суурь болгон авч 2023 он болон 2024 онуудын өөрчлөлтийг гаргасан. Олон улсад мөстлөгийн хайлалтад агаарын температурын нөлөөллийг олон судалгаагаар харуулсан байдаг (Sicart et al., 2008). Ялангуяа тодорхой хугацааны туршид цас эсвэл мөсний хайлалтыг тухайн үеийн хайлах хэмээс дээш гарсан бүх температурын нийлбэртэй пропорциональ гэж үздэг (Singh et al., 2000). Агаарын температурыг цельсээр хэмжсэн тохиолдолд энэ нийлбэрийг нэмэх хэмтэй өдрийн нийлбэр (PDD-Positive Degree Day) гэж нэрлэдэг (Singh et al., 2000). Энэхүү загвар нь мөстлөгийн өдөр тутмын хайлалтын хэмжээг өдрийн дундаж агаарын температур, хайлалтын коэффициент (DDF-Degree Day Factors) ашиглан тооцдог. Бидний хувьд автомат станцын 2023-2024 оны агаарын температурын өдөр тутмын мэдээг ашиглан загвараа тооцоолсон. Үүнд:

$$DDF = \sum_{i=1}^{n}(T_i - T_0), T_i > T_0 \quad (1)$$

Энд, T_i – Тухайн үеийн дундаж агаарын температур (0°C), T_0 – Хайлалтын суурь температур (0°C), *DDF* – Хайлалтын коэффициентууд (мм/өдөр$^{-1}$°C).

DDF нь эерэг температуртай нэг өдөрт мөс эсвэл цас хэдэн мм усны эквивалентаар хайлж байгааг илтгэх туршилтын эмпирик хэмжигдэхүүн юм. (Singh et al., 2000). DDF нь мөсний гадаргын альбедо, бохирдлын хэмжээ, гадаргын өнгө, налуугийн өнцөг, орчны салхины хурд, өндөршил зэрэг олон хүчин зүйлээс хамаарч хэлбэлзэж байдаг (Singh et al., 2000). Үүнээс нийт хайлалтын хэмжээг дараах байдлаар тооцсон. Үүнд:

$$M = DDF_{s,i} * PDD \qquad PDD \geq 0°C \quad (2)$$

$$M = 0 \qquad PDD < 0°C \quad (3)$$

Энд, *M* – Нийт хайлалтын хэмжээ (мм усны эквивалент), *PDD* – Нэмэх хэмтэй өдрүүдийн нийлбэр агаарын температур (°C).

Загварын шалгалтыг 2023 оны 6 сарын 15 өдөр ШУА-Газарзүй, Геоэкологийн хүрээлэнгийн Цэвдэг судлалын салбарын судлаачид 9 байршилд 4 метрийн гүнтэй өрөмдөж суулгасан хэмжилтийн шонгийн өгөгдлөөр хийсэн (Зураг 2).

Зураг 2. Мөстлөг дээр хэмжилтийн шон суурилуулж буй байдал (Гэрэл зургийг Х.Тэмүүжин)

Орон зайн тархалттай загваруудын хувьд тухайн газрын хотгор, гүдгэр, байрлалын нөлөөг тусгахын тулд температурын тархалтыг тооцох шаардлагатай болдог (Gardner & Sharp, 2009). Үүнийг ихэвчлэн өндрийн тоон загвар (DEM) болон агаарын температурын тогтмол градиент (lapse rate) ашиглан тооцдог (Hock, 2003). Судалгааны талбайд станц болон мөстлөгийн алдралын бүсийн дээд хилийн өндрийн зөрүүтэй байдлыг Олон улсын стандарт агаар мандлын (ISA-International Standard Atmosphere) температурын буурах хандлагыг ашигласан бөгөөд энэ нь чөлөөт агаар дахь тогтмол температурын градиент хэрэглэдэг бөгөөд өндрөөр 1,000 фут тутамд 2°C (эсвэл 3.5°F), буюу 1,000 м тутамд 6.5°C-аар буурдаг (Gardner & Sharp, 2009) гэж үзэн алдралын бүсийн доод хил, гол хэсэг, дээд хэсэгт хуваан *DDM* утгыг тус бүрт тооцсон.

Температурын өндрийн засал хийсэн эерэг температуртай өдрийн нийлбэрийг дараах байдлаар тооцоолов. Үүнд:

Зураг 3. Цаг уурын автомат станцын байрлал (Гэрэл зургийг Ц.Билгүүн)

$$PDD_{\Delta} = PDD_{\text{станц}} - (0.0065 * h_{\Delta}) \quad (4)$$

Энд, PDD_{Δ} – Температурын өндрийн засал хийсэн эерэг температуртай өдрийн нийлбэр, $PDD_{\text{станц}}$ – Цаг уурын автомат станц дээрх эерэг температуртай өдрийн нийлбэр, h_{Δ} – Цаг уурын автомат станц болон алдралын бүсийн гол, дээд хилийн өндрийн зөрүү (Wu et al., 2011) юм.

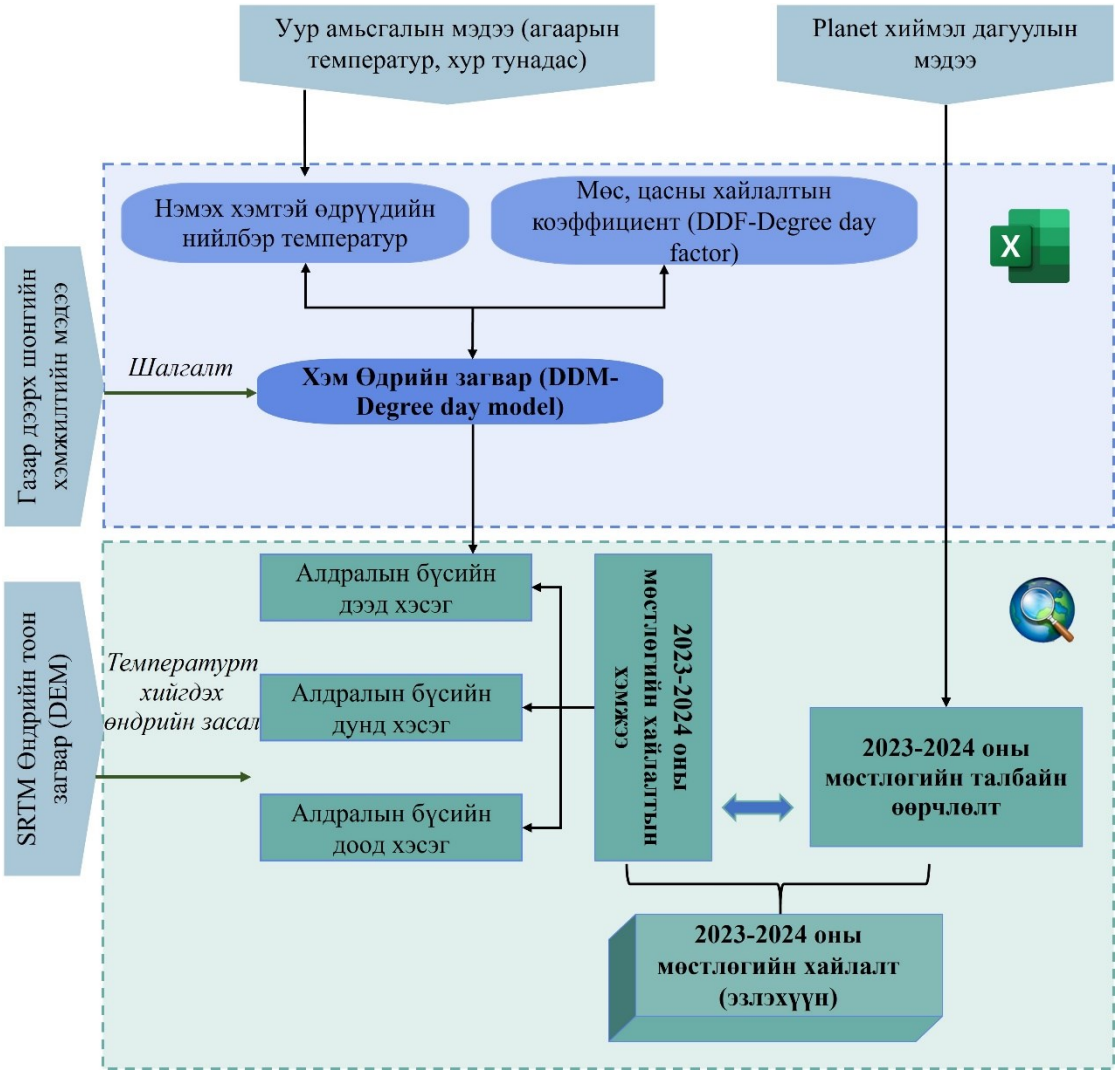
Хоёрдугаарт, Мөстлөгийн талбайг тодорхойлохдоо https://www.planet.com/explorer/ цахим хуудас руу Долооннуурын мөсөн гол орчмын талбайг polygon shape хэлбэрээр үүсгэн импорт хийж оруулан 3-7 метрийн нарийвчлалтай зурагнуудыг татан авч ARCGIS 10.8 программ хангамжийн тусламжтай зурагласан. Планет https://www.planet.com-ын CubeSat-ууд (Dove) болон өндөр нягтаршилтай SkySat зэрэг хиймэл дагуулын мэдээллийн бааз бүхий компани юм. Планет хиймэл дагуулын мэдээгээр дэлхийн гадаргыг өдөр бүр хамардаг хурдацтай, давтамжтай (daily revisit) орчны мэдээлэл нийлүүлдэг тул цаг уурын мониторинг, хөдөө аж ахуй, ой судлал, усны нөөц зэрэг олон хэрэглээнд өргөн ашигладаг.

Талбайн өөрчлөлтийг нийт хайлалтын хэмжээгээр үржүүлж 2023-2024 оны хоорондох алдралын бүсийн хайлсан мөсний эзэлхүүнийг тооцсон. Үүнд:

$$V_{loss} = M * A \quad (5)$$

Энд, V_{loss} – Мөстлөгийн алдсан эзэлхүүн (м^3), M– Нийт хайлалтын хэмжээ (мм усны эквивалент), A – Хайлалт явагдсан мөстлөгийн талбай м^2 (Rashid et al., 2021) юм.

Судалгаанд ашигласан дээрх аргуудыг нэгтгэж дараах аргазүйн бүдүүвчийг боловсруулж энэ судалгаанд ашигласан (Зураг 4).

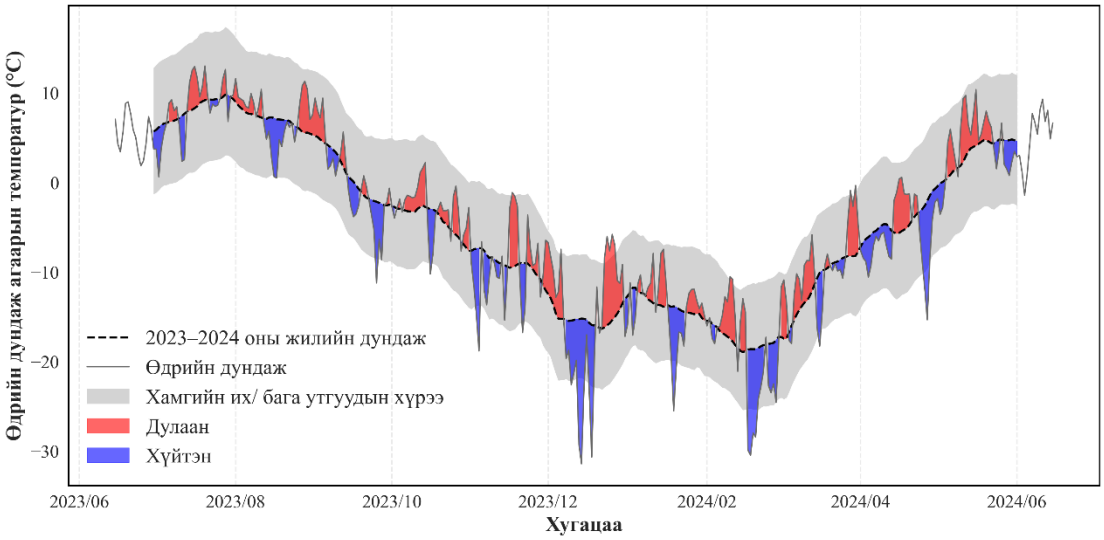


Зураг 4. Судалгааны аргазүйн бүдүүвч

Судалгааны үр дүн

Агаарын температурын хандлага: Энэхүү судалгаагаар Монгол Алтайн нурууны Мөнххайрхан уулын Долооннуурын мөсөн голын 2023–2024 оны хоорондох жилийн алдралыг Хэм-өдрийн загвар (*DDM*) ашиглан тооцож, бодит талбайн хэмжилтийн өгөгдлөөр баталгаажуулаа. Автомат цаг уурын станцын нэг жилийн ажиглалтаар эерэг температуртай өдрийн нийлбэр (*PDD*) 844.8

°C·өдөр байсан нь тус бүс нутагт зуны улирлын дулаарал эрчимтэй явагдаж байгааг илтгэнэ (Зураг 5).



Зураг 5. Долооннуурын мөсөн голын сарын дундаж агаарын температурын хандлага

Долооннуурын мөсөн гол орчмын 2023–2024 оны хугацаанд өдрийн дундаж агаарын температур улирлын хэмнэлтэйгээр өөрчлөгдөж, зуны улиралд эерэг, өвлийн улиралд хүчтэй сөрөг утгууд давамгайлж байгааг харуулна. Өвлийн улиралд температурын огцом хэлбэлзэл тод илэрч, харин дулааны улиралд харьцангуй тогтвортой, эерэг температур зонхилж байна. Энэ нь улирлын температурын ялгаа ихтэй, эх газрын уур амьсгалын гол онцлог юм.

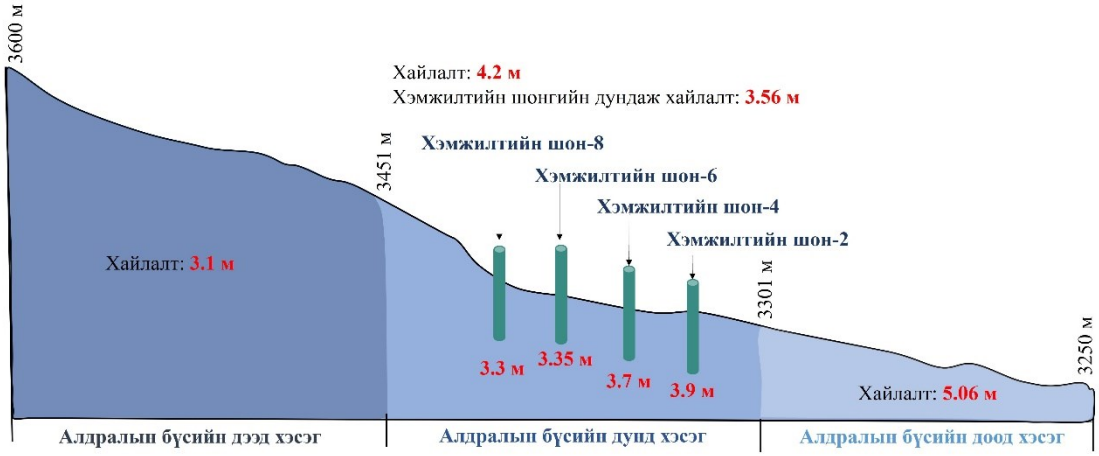
Температурын өндрийн засвар (Lapse-rate correction): Цаг уурын автомат станц ба мөстлөгийн доод хэсэг хооронд 8 метрийн өндрийн зөрүүтэй байгаа тул температын утгыг ижил утгатай гэж үзсэн. Бид алдралын бүсийн гол хэсэг болон дээд хэсэгт өндрийн засвар хийж утгуудыг тооцсон ба дээд хилийн хэсэгт 3,451-3,600 метр, гол хэсэгт 3,301-3450 метр, доод хэсэгт 3,250-3,300 метр хүртэлх өндрийг хамааруулан авч үзсэн (Зураг 6). Тооцоогоор $PDD_{\text{дээд}}$ -530.8 °C, $PDD_{\text{гол}}$ -710.0 °C гарсан. Хүчин зүйл тус бүрийг ашиглан нийт хайлалтын хэмжээг гаргасан (Хүснэгт 1).

Хүснэгт 1. Температурын өндрийн засал хийж нийт хайлалтын тооцоо

DDF (мм усны эквивалент/$°C*$ өдөр)	$PDD_{\text{доод}}$ ($°C*$ өдөр)	$PDD_{\text{гол}}$ ($°C*$ өдөр)	$PDD_{\text{дээд}}$ ($°C*$ өдөр)	Нийт хайлалт$_{\text{доод}}$ (мм усны эквивалент)	Нийт хайлалт$_{\text{гол}}$ (мм усны эквивалент)	Нийт хайлалт$_{\text{дээд}}$ (мм усны эквивалент)
6.0 мөс	844.8	710.0	530.8	5,068.8	4,260	3,184.8

Температурын өндрийн засвар (lapse rate correction)-ыг ашиглан алдралын бүсийг доод, гол, дээд хэсэгт хуваан тооцоход жилийн хайлалтын зузаан доод хэсэгт 5.06 м, гол хэсэгт 4.2 м, дээд хэсэгт 3.1 м, дунджаар 4.1 м гарсан. Температурын өндрийн засварын (lapse rate correction) үр дүнгээс харахад хайлалтын зузаан өндөршлөөр өөрчлөгдөж байгаа нь уулын гадарга өндөршлийн хүчтэй градиенттэй, микро-рельефийн налуу, экспозицийн ялгаа мөсөн хайлалтын эрчмийг тодорхой хэмжээгээр удирддаг болохыг гэрчилнэ.

***Мөс хайлалтын тооцоо, хээрийн хэмжилт, баталгаажуулалт**:* 2024 оны хэмжилтээр нийт 9 шонгоос 4 шонгийн хэмжилтийг тэмдэглэсэн ба бусад шон 4-өөс дээш метр хайлсан эсвэл хүчтэй салхины улмаас хугарсан эсэх тодорхойгүй тул тэмдэглэсэн 4 шонгийн хэмжилтийн утгаар загварыг баталгаажуулалт хийв (Зураг 6, Хүснэгт 2).



Зураг 6. Загвараар гарсан цэвэр мөстэй үеийн хайлалтыг шонгийн хэмжилттэй харьцуулсан байдал

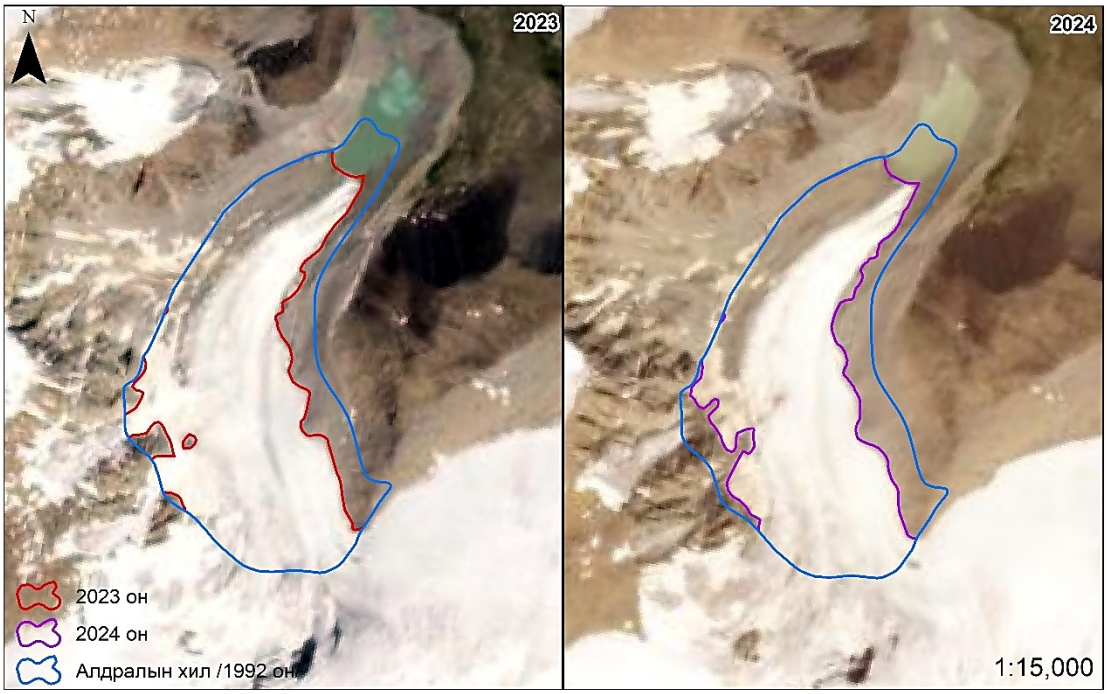
Загварын үр дүнг бодит талбайн хэмжилтээр баталгаажуулахад, 2024 онд хэмжсэн шонгийн дундаж хайлалт 3.6 м байсан ба загварын дүнтэй 0.5 м-ийн зөрүүтэй гарсан нь DDM-ийн үр дүн өндөр таарцтай байгааг харуулж байна. Олон улсын судалгаанд DDM-ийг энергийн тэнцлийн загвартай харьцуулахад өгөгдөл багатай нөхцөлд найдвартай үр дүн өгдөг (Huss et al., 2017) болохыг тэмдэглэсэн байдаг. Иймээс энэхүү судалгааны үр дүн нь Монголын алслагдсан уулын бүсүүдэд мөстлөгийн жилийн масс алдралыг үнэлэхэд DDM үр ашигтай арга болохыг нотолж байна (Хүснэгт 2).

Хүснэгт 2. Хээрийн хэмжилт, баталгаажуулалт

№	Өндөр м /д.т.д/	Солбилцол		Хайлсан хэмжээ
		N	E	
1	3,292	46°54'37.8"N	91°28'14.2"E	-
2	3,309	46°54'43.6"N	91°28'12.8"E	3.9
3	3,312	46°54'45.3"N	91°28'13.8"E	-
4	3,315	46°54'41.1"N	91°28'13.5"E	3.7
5	3,321	46°54'43.0"N	91°28'14.6"E	-
6	3,332	46°54'34.8"N	91°28'12.1"E	3.35
7	3,336	46°54'41.8"N	91°28'17.4"E	-
8	3,346	46°54'33.8"N	91°28'13.7"E	3.3
9	3,348	46°54'35.0"N	91°28'14.6"E	-

Мөстлөгийн дагуух өндрийн зүсэлтээс үзэхэд хайлалтын хэмжээ доороос дээш нэмэгдэх хандлага ажиглагдаж, алдралын доод хэсэгт хамгийн их (5.06 м), дунд хэсэгт дунджаар 3.3–3.9 м, дээд хэсэгт хамгийн бага (3.1 м) хайлалт бүртгэгдсэн байна. Хэмжилтийн шонгуудаар тодорхойлсон дунджаар 3.56 м-ийн хайлалт нь өндөршлийн температурын ялгаа болон уулын гадаргын налуу, экспозици, рельеф зэрэг орон зайн хүчин зүйлс мөстлөгийн масс-алдралын ялгаатай байдалд нөлөөлсөн байх боломжтой юм.

Мөстлөгийн өөрчлөлт болон массын алдагдал: Мөстлөгийн талбайн өөрчлөлтийг тооцооход Долооннуурын мөсөн голын алдралын бүсийн талбай 2023–2024 оны хооронд 5.3 га (≈5%)-аар багассан (Зураг 7). Үүнийг дундаж хайлалтын зузаантай уялдуулан тооцоход нийт ≈2.18 × 10^5 м³ мөсний эзэлхүүн алдагдсан байна. Энэ нь дэлхийн хэмжээний судалгаанд дурдсан сүүлийн үеийн мөстлөгийн масс алдагдлын хурдтай нийцэж байгаа бөгөөд 2000–2023 онд дэлхийн уулын мөстлөгүүд жилд дунджаар 273 ± 16 Гт массаа алдсан гэсэн дүнтэй харьцуулахад (The GlaMBIE Team et al., 2025b) бүс нутгийн түвшинд ч мөн ижил чиг хандлага ажиглагдаж байгааг харуулна.



Зураг 7. Долооннуурын мөсөн голын алдралын 2023-2024 оны өөрчлөлтийн харьцуулалт

2023–2024 оны хиймэл дагуулын зургаар илэрхийлэгдсэн мөстлөгийн алдралын хил тасралтгүй ухарч, ил гарсан мөстлөгийн гаралтай талбай богино хугацаанд нэмэгдсэн нь уур амьсгалын дулаарал Монгол Алтайн өндөр уулын орчинд шууд нөлөөлж байгааг тодорхой харуулна. Сүүлийн жилүүдэд дулааны улирлын агаарын температур өсөж, 0 °C-ын шугам (freezing level) дээш шилжсэнээр мөстлөгийн доод болон дунд хэсэгт хайлалтын улирал уртасч, жил тутмын цэвэр масс-баланс тогтвортойгоор сөрөг утгатай болж байгаа (Khalzan et al., 2022)-г энэ үр дүн давхар нотолж байна.

Сансрын зураглалд 1992 оны алдралын хилтэй харьцуулахад 2023–2024 онд ажиглагдаж буй огцом ухралт нь температурын өсөлтөөс шалтгаалсан өөрчлөлт болон хур тунадасны хэлбэлзэлтэй шууд холбоотой байж болох юм. Ялангуяа зуны улиралд хур тунадас шингэн хэлбэрээр орж, цас-мөсний гадаргын альбедо буурснаар хайлалтын эрч нэмэгдэж, мөстлөгийн талбай агших хандлага сүүлийн жилүүдэд илэрсээр байгаа (Walther et al., 2017; Pan et al., 2019; Khalzan et al., 2022; Demberel et al., 2023; Tsedevdorj et al., 2025)-тай энэ үр дүн нийцэж байна. Иймээс ажиглагдсан мөстлөгийн талбайн агшилт, алдралын бүсийн дээш шилжилт нь байгалийн богино хугацааны хэлбэлзлээс илүүтэйгээр уур амьсгалын системийн урт хугацааны дулаарал Монгол Алтайн мөстлөгүүдийн орчин үеийн динамикийг голлон тодорхойлж байгааг нотолж байна.

Хэлэлцүүлэг

Мөнххайрхан уулын Долооннуурын мөсөн голд хийсэн энэхүү судалгаагаар Хэм-өдрийн загварыг ашиглан мөстлөгийн хайлалтыг тооцоход бодит хэмжилтээс ердөө 0.5 м-ийн зөрүүтэй гарсан нь уг аргачлал өгөгдөл багатай үед ч нарийвчлал харьцангуй сайн гарах боломжтойг илтгэж байна. Цаашлаад судалгааны үр дүнд тус мөсөн голын алдралын бүсэд дунджаар 4.1 м хайлсан байна. Энэ нь Монгол Алтайн бусад мөстлөгүүдийн жилийн дундаж хайлалт 3-5 м-ийн хооронд байна (Demberel et al., 2023; Ganyushkin et al., 2022) гэх судалгааны үр дүнгүүдтэй нийцэж байна. Мөн түүнчлэн бүс нутгийн хэмжээнд мөстлөгийн масс алдагдал эрчимтэй явагдаж буйг харуулж байна. Тийм ч учраас сүүлийн үеийн судалгаанууд мөсөн голын өөрчлөлтийг зөвхөн масс, талбайгаар бус мөсөн гол бүрмөсөн устах эрсдэлтэй холбон авч үзэх шаардлагатайг онцолсоор байна (Khalzan et al., 2022; Tsedevdorj, 2021; Calvin et al., 2023; Dussaillant et al., 2025). Долооннуурын мөсөн голын доод хил 1990 оноос хойш 167 м-ээр ухарч шилжсэн**,** мөсөн ханатай нуурын талбай огцом тэлсэн зэрэг нь энэхүү мөсөн гол цаашид хурдан агших өндөр эрсдэлтэйг илтгэж байна. Ийм өөрчлөлт нь зөвхөн гидрологийн төдийгүй орон нутгийн экосистем, усны нөөц, аялал жуулчлалын ач холбогдолд сөргөөр нөлөөлөх боломжтой (Huss et al., 2017; Vuille et al., 2018). Энэхүү судалгааны DDM загвар нь тооцооллын хувьд хялбар боловч хур тунадасны хэмжээ, температур хоорондын хамаарал тогтворгүй болох зэрэг уур амьсгалын хувьсамтгай нөхцөлд загварын алдаа (bias) нэмэгдэх магадлалтай. Энэ нь уг аргын хязгаарлагдмал байдлыг илтгэж байна (Braithwaite & Zhang, 1999; Zheng et al., 2023). Ялангуяа Долооннуурын мөсөн голын хувьд алдралын бүсийн талбай нэг жилийн дотор ≈ 5%-иар буурсан нь уур амьсгалын өөрчлөлтөд өндөр мэдрэг байгааг илтгэх ба цаашид зөвхөн температураас гадна нарны цацрагийн нөлөөг загварт нэмэлтээр тусгах нь тооцооллыг илүү нарийвчлалтай болгох боломжтой (Hock, 1999). Мөн бидний тооцоололд мөсний хайлалтын коэффициентийг (DDF=6.0 мм усны экв/°C·өдөр) болон температурын өндрийн засварыг (1,000 м тутамд 6.5°C буурна) жигд авч үзсэн. Тооцооллын үр дүн алдралын бүс дэх мөсний хайлалтыг харьцангуй бодитой илэрхийлсэн. Гэвч цасны хайлалтын коэффициент буюу өвлийн улиралд хуримтлагдсан цасны хайлалтыг тусад нь ялгаагүй. Энэ нь загвар болон бодит хэмжилтийн хооронд гарсан 0.5 м-ийн зөрүүгийн нэг шалтгаан байж болох юм (Hock, 2003b; Zhang et al., 2012). Иймд цаашид загварын нарийвчлал болон тооцооллын үр дүнг сайжруулахын тулд цас, мөсний хайлалтын коэффициентийг тусад нь авч үзэж, тэдгээрийг өөр өөр өндрийн температурын градиент болон албедо, зайнаас тандан судлалын өгөгдөлтэй хослуулан ашиглах нь зүйтэй юм.

Дүгнэлт

Энэхүү судалгаанд Мөнххайрхан уулын Долооннуурын мөсөн голын 2023-2024 оны хоорондох хайлалтын хэмжээг Хэм-өдрийн загварын аргаар тооцож, бодит талбайн хэмжилттэй харьцуулан үнэлгээ хийв. Автомат цаг уурын станцын агаарын температурын 1 жилийн (2023.06.15–2024.06.15) мэдээг ашиглан тооцоолоход эерэг температуртай өдрийн нийлбэр (*PDD*) нийт 844.8 °C·өдөр гарсан. Температурын өндрийн засварыг *DDF* = 6.0 (мөс) утгуудыг ашиглан хийж мөстлөгийн нийт хайлалтын хэмжээг тооцоход: Алдралын бүсийн доод хэсэгт -5.06 м, гол хэсэгт -4.2 м, дээд хэсэгт -3.1 м буюу дундаж нь 4.1 м хайлсан байна. Загвар болон бодит хэмжсэн шонгийн зөрүү нь 0.5 м гарсан нь *DDM* загварын тооцоог бодитой гэж үзэж байна.

Мөстлөгийн алдралын бүсийн талбай 2023 оноос 2024 онд 5.3 га-аар (≈ 5%) буурч нийт 218,000 м³ орчим мөсний эзлэхүүн хайлсан байна. Энэ нь Монгол Алтайн мөстлөгийн нийт бууралт (3-5 м/жил орчим) тай дүйцэж байна. Иймд энэхүү судалгааны үр дүн нь Монгол Алтайн бүсийн мөстлөгүүд уур амьсгалын дулааралд өндөр мэдрэг байгааг дахин нотолж, жилийн масс алдралын тоон үнэлгээг орон нутгийн бодит өгөгдөлд тулгуурлан гаргасан чухал жишээ болж байна. Цаашид олон жилийн тасралтгүй температур, хур тунадас, албедо болон хиймэл дагуулын

өгөгдлийг хослуулснаар Монголын уулын мөстлөгийн ирээдүйн хувьсал, устах эрсдэлийг илүү нарийвчлалтай үнэлэх боломж бүрдэх юм.

Ном зүй

1. Даваа, Г., Кадота, Т., Коня, К., Пүрэвдавгаа, Х., Даваадорж, Н., Баасандорж, Д., Батхүү, Д., Юра, Н., Хаш-Эрдэнэ, Т., Содномбалжир, Ш., & Бахатбол, З. (2012). Монгол орны мөстөл, мөсөн голын хөдлөлзүй, масс баланс ба өөрчлөлтийн хандлага. *ЭШБХ-Ын Эмхэтгэл*, 22–35.
2. Дашцэрэн, А. (2018). *Хүйтэн мандал*. ТЭПЭ ХХК.
3. Дуламсүрэн, Д. (2022). Монгол орны улирлын уур амьсгалын өнөөгийн өөрчлөлт, *Уур амьсгалын өөрчлөлтийн үндэсний 4 дүгээр тайлан,* Улаанбаатар хот. 6-14
4. Отгонбаяр, Д. (2012). Водно-ледниковые ресурсы бессточных районов Западной Монголии: Современная оценка и тенденции изменения. *Дис. На Соиск. Уч. Ст. к. г. н. По Спец*, *25*, 36.
5. Alerstam, T., Gudmundsson, G. A., Green, M., & Hedenström, A. (2001). Migration Along Orthodromic Sun Compass Routes by Arctic Birds. *Science*, *291*(5502), 300–303. https://doi.org/10.1126/science.291.5502.300
6. Altanbold, E., Ulambadrakh, K., Dash, D., Seong, Y. B., Batzorig, B., Gansukh, Y., & Ser-Od, T. (2025). Delineating the boundary between the Mongolian Altay and Gobi-Altay Mountain Ranges: A Geomorphic Approach: Монгол Алтай, Говь-Алтайн нурууны хил заагийг тогтоох асуудалд. *Geographical Issues*, *25*(02), 115-134. https://doi.org/10.22353/gi.2025.25.16
7. Bahr, D. B., Meier, M. F., & Peckham, S. D. (1997). The physical basis of glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *102*(B9), 20355–20362. https://doi.org/10.1029/97JB01696
8. Bantcev, D. V., Ganyushkin, D. A., Chistyakov, K. V., Volkov, I. V., Ekaykin, A. A., Veres, A. N., Tokarev, I. V., Shtykova, N. B., & Andreeva, T. A. (2019). The Components of the Glacial Runoff of the Tsambagarav Massif from Stable Water Isotope Data. *Geosciences*, *9*(7), 297. https://doi.org/10.3390/geosciences9070297
9. Bliss, A., Hock, R., & Radić, V. (2014). Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *119*(4), 717–730. https://doi.org/10.1002/2013JF002931
10. Braithwaite, R. J., & Zhang, Y. (1999). Relationships between interannual variability of glacier mass balance and climate. *Journal of Glaciology*, *45*(151), 456–462. https://doi.org/10.3189/S0022143000001313
11. Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., … Péan, C. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
12. Cuffey, K. M., & Paterson, W. S. B. (2010). *The physics of glaciers*. Academic Press.
13. Demberel, O., Munkhbat, B., Dorjsuren, B., Callaghan, T. V., Tsogoo, B., Zemtsov, V. A., Shaarav, O., Gongor, E., Jargalsaikhan, Z., Ganhuyag, N., Khovalyg, A. O., & Kirpotin, S. N. (2023). Relationship between Dynamics of Modern Glaciers of the Mt. Munkhkhairkhan (Mongolian Altai) and Climate. *Water*, *15*(10), 1921. https://doi.org/10.3390/w15101921
14. Dorjsuren, B., Yan, D., Wang, H., Chonokhuu, S., Enkhbold, A., Yiran, X., Girma, A., Gedefaw, M., & Abiyu, A. (2018). Observed Trends of Climate and River Discharge in Mongolia's Selenga Sub-Basin of the Lake Baikal Basin. *Water*, *10*(10), 1436. https://doi.org/10.3390/w10101436

15. Dorjsuren, B., Zemtsov, V. A., Batsaikhan, N., Demberel, O., Yan, D., Hongfei, Z., ... & Siyu, W. (2024). Trend analysis of hydro-climatic variables in the Great Lakes Depression region of Mongolia. *Journal of Water and Climate Change*, *15*(3), 940-957. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.379
16. Dussaillant, I., Hugonnet, R., Huss, M., Berthier, E., Bannwart, J., Paul, F., & Zemp, M. (2025). Annual mass change of the world's glaciers from 1976 to 2024 by temporal downscaling of satellite data with in situ observations. *Earth System Science Data*, *17*(5), 1977–2006. https://doi.org/10.5194/essd-17-1977-2025
17. Enkhbold, A., Dingjun, L., Ganbold, B., Yadamsuren, G., Tsasanchimeg, B., Dorligjav, S., ... & Boldbayar, R. (2024). Changes in morphometric parameters of lakes in different ecological zones of Mongolia: implications of climate change. *Climate Research*, *92*, 79-95. https://doi.org/10.3354/cr01734
18. Enkhbold, A., Khukhuudei, U., Seong, Y. B., Gonchigjav, Y., Dingjun, L., & Ganbold, B. (2024b). Geomorphological study of the origin of Mongolian Altai Mountains Lake depressions: implications for the relationships between tectonic and glacial processes. *Mongolian Geoscientist*, *29*(58), 1-18. https://doi.org/10.5564/mgs.v29i58.3237
19. Enkhbold, A., Khukhuudei, U., Seong, Y. B., Yadamsuren, G., Batbold, B., Davaasuren, D., ... & Ganbold, B. (2025). Tectonic geomorphology of the lake depressions in the Mongolian Altai mountains, western Mongolia. *Frontiers in Earth Science*, *13*, 1605844. https://doi.org/10.3389/feart.2025.1605844
20. Filandysheva, L. B., Borodavko, P. S., & Demberel, O. (2022). Climatogenic Cryomorphogenesis in the Southeastern Altai Mountains. *Contemporary Problems of Ecology*, *15*(3), 212–221. https://doi.org/10.1134/S1995425522030040
21. Ganyushkin, D., Chistyakov, K., Derkach, E., Bantcev, D., Kunaeva, E., Terekhov, A., & Rasputina, V. (2022). Glacier Recession in the Altai Mountains after the LIA Maximum. *Remote Sensing*, *14*(6), 1508. https://doi.org/10.3390/rs14061508
22. Gardner, A. S., & Sharp, M. (2009). Sensitivity of net mass-balance estimates to near-surface temperature lapse rates when employing the degree-day method to estimate glacier melt. *Annals of Glaciology*, *50*(50), 80–86. https://doi.org/10.3189/172756409787769663
23. Harrison, S., Kargel, J. S., Huggel, C., Reynolds, J., Shugar, D. H., Betts, R. A., Emmer, A., Glasser, N., Haritashya, U. K., Klimeš, J., Reinhardt, L., Schaub, Y., Wiltshire, A., Regmi, D., & Vilímek, V. (2018). Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*, *12*(4), 1195–1209. https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018
24. Hock, R. (1999). A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology*, *45*(149), 101–111. https://doi.org/10.3189/S0022143000003087
25. Hock, R. (2003). Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, *282*(1–4), 104–115. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00257-9
26. Huss, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R. S., Clague, J. J., Vuille, M., Buytaert, W., Cayan, D. R., Greenwood, G., Mark, B. G., Milner, A. M., Weingartner, R., & Winder, M. (2017). Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, *5*(5), 418–435. https://doi.org/10.1002/2016EF000514
27. Jargalsaikhan, Z., Dorjsuren, B., Demberel, O., Enkhbold, A., Batmunkh, D., Adnan, M., & Gao, H. (2025). Considerable potential for artificial ice reservoirs in the Mongolian Altai mountains to mitigate the impact of climate change on water security in arid western Mongolia. *Cold Regions Science and Technology, 242,* 104748. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2025.104748
28. Kamp, U., Krumwiede, B., McManigal, K., Pan, C., Walther, M., & Dashtseren, A. (2013). The glaciers of Mongolia. *INSTAAR Occas. Pap*, *61*.

29. Kamp, U., Walther, M., & Dashtseren, A. (2022). Mongolia's cryosphere. *Geomorphology*, *410*, 108202. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108202
30. Khalzan, P., Sakai, A., & Fujita, K. (2022). Mass balance of four Mongolian glaciers: In-situ measurements, long-term reconstruction and sensitivity analysis. *Frontiers in Earth Science*, *9*, 785306. https://doi.org/10.3389/feart.2021.785306
31. Khukhuudei, U., Kusky, T., Otgonbayar, O., & Wang, L. (2020). The early palaeozoic mega-thrusting of the gondwana-derived altay–lake zone in Western Mongolia: Implications for the development of the central asian orogenic belt and paleo-asian ocean evolution. *Geological Journal*, *55*(3), 2129-2149. https://doi.org/10.1002/gj.3753
32. Krumwiede, B. S., Kamp, U., Leonard, G. J., Kargel, J. S., Dashtseren, A., & Walther, M. (2014). Recent Glacier Changes in the Mongolian Altai Mountains: Case Studies from Munkh Khairkhan and Tavan Bogd. In J. S. Kargel, G. J. Leonard, M. P. Bishop, A. Kääb, & B. H. Raup (Eds.), *Global Land Ice Measurements from Space* (pp. 481–508). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79818-7_22
33. Li, X., Zhang, L., Yang, G., Li, H., He, B., Chen, Y., & Tang, X. (2015). Impacts of human activities and climate change on the water environment of Lake Poyang Basin, China. *Geoenvironmental Disasters*, *2*(1), 22. https://doi.org/10.1186/s40677-015-0029-2
34. Milner, A. M., Brown, L. E., & Hannah, D. M. (2009). Hydroecological response of river systems to shrinking glaciers. *Hydrological Processes*, *23*(1), 62–77. https://doi.org/10.1002/hyp.7197
35. Nandintsetseg, B., Boldgiv, B., Chang, J., Ciais, P., Davaanyam, E., Batbold, A., ... & Stenseth, N. C. (2021). Risk and vulnerability of Mongolian grasslands under climate change. *Environmental Research Letters*, *16*(3), 034035. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdb5b
36. Orkhonselenge, A., & Harbor, J. M. (2018). Impacts of Modern Glacier Changes on Surface Water Resources in Western and Northern Mongolia. *Journal of Water Resource and Protection*, *10*(06), 559–576. https://doi.org/10.4236/jwarp.2018.106031
37. Pan, C. G., Kamp, U., Munkhjargal, M., Halvorson, S. J., Dashtseren, A., & Walther, M. (2019). An Estimated Contribution of Glacier Runoff to Mongolia's Upper Khovd River Basin in the Altai Mountains. *Mountain Research and Development*, *39*(2). https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-18-00059.1
38. Plyusnin, V. M., Kitov, A. D., Ivanov, E. N., & Sheinkman, V. S. (2013). Distinctive characteristics of formation and dynamics of nival-glacial geosystems in the south of East Siberia and on Mongolian Altai. *Geography and Natural Resources*, *34*(1), 1–13. https://doi.org/10.1134/S1875372813010010
39. Rashid, I., Majeed, U., Najar, N. A., & Bhat, I. A. (2021). Retreat of Machoi Glacier, Kashmir Himalaya between 1972 and 2019 using remote sensing methods and field observations. *Science of The Total Environment*, *785*, 147376. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147376
40. Sicart, J. E., Hock, R., & Six, D. (2008). Glacier melt, air temperature, and energy balance in different climates: The Bolivian Tropics, the French Alps, and northern Sweden. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *113*(D24), 2008JD010406. https://doi.org/10.1029/2008JD010406
41. Singh, P., Kumar, N., & Arora, M. (2000). Degree–day factors for snow and ice for Dokriani Glacier, Garhwal Himalayas. *Journal of Hydrology*, *235*(1–2), 1–11. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00249-3
42. The GlaMBIE Team, Zemp, M., Jakob, L., Dussaillant, I., Nussbaumer, S. U., Gourmelen, N., Dubber, S., A, G., Abdullahi, S., Andreassen, L. M., Berthier, E., Bhattacharya, A., Blazquez, A., Boehm Vock, L. F., Bolch, T., Box, J., Braun, M. H., Brun, F., Cicero, E., … Zheng, W. (2025a). Community estimate of global glacier mass changes from 2000 to 2023. *Nature*, *639*(8054), 382–388. https://doi.org/10.1038/s41586-024-08545-z
43. The GlaMBIE Team, Zemp, M., Jakob, L., Dussaillant, I., Nussbaumer, S. U., Gourmelen, N., Dubber, S., A, G., Abdullahi, S., Andreassen, L. M., Berthier, E., Bhattacharya, A., Blazquez, A.,

Boehm Vock, L. F., Bolch, T., Box, J., Braun, M. H., Brun, F., Cicero, E., … Zheng, W. (2025b). Community estimate of global glacier mass changes from 2000 to 2023. *Nature*, *639*(8054), 382–388. https://doi.org/10.1038/s41586-024-08545-z

44. Tsedevdorj, S. O., Khurelbaatar, T., Ganbold, U., Yadamsuren, G., Avkhinsukh, A., Erkhembayar, B., ... & Enkhbold, A. (2025). Climate change impact of land cover changes in the Kharhiraa-Turgen mountain region. *Mongolian Geoscientist*, *30*(61), 1-13. https://doi.org/10.5564/mgs.v30i61.3866
45. Tsedevdorj, S. O. (2021). Glaciers of Mongolia. In *The Physical Geography of Mongolia* (pp. 101-117). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61434-8_6
46. Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Elison Timm, O., Condom, T., Salzmann, N., & Sicart, J.-E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, *176*, 195–213. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019
47. Walther, M., Dashtseren, A., Kamp, U., Temujin, K., Meixner, F., Pan, C. G., & Gansukh, Y. (2017). Glaciers, Permafrost and Lake Levels at the Tsengel Khairkhan Massif, Mongolian Altai, During the Late Pleistocene and Holocene. *Geosciences*, *7*(3), 73. https://doi.org/10.3390/geosciences7030073
48. Wu, L., Li, H., & Wang, L. (2011). Application of a degree-day model for determination of mass balance of Urumqi Glacier No. 1, eastern Tianshan, China. *Journal of Earth Science*, *22*(4), 470–481. https://doi.org/10.1007/s12583-011-0201-x
49. Yongjian, D., Shiqiang, Z., & Rensheng, C. (2020). Cryospheric hydrology: Decode the largest freshwater reservoir on earth. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*, *35*(4), 414–424. https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20200302002
50. Zhang, S., Ye, B., Liu, S., Zhang, X., & Hagemann, S. (2012). A modified monthly degree-day model for evaluating glacier runoff changes in China. Part I: Model development. *Hydrological Processes*, *26*(11), 1686–1696. https://doi.org/10.1002/hyp.8286
51. Zheng, Y., Golledge, N. R., Gossart, A., Picard, G., & Leduc-Leballeur, M. (2023). Statistically parameterizing and evaluating a positive degree-day model to estimate surface melt in Antarctica from 1979 to 2022. *The Cryosphere*, *17*(9), 3667–3694. https://doi.org/10.5194/tc-17-3667-2023