



Automated processing of data from mobile stations deployed after the Tonkhil's strong earthquake

Dolgormaa Munkhbaatar^{1*} and Ulziibat Munkhuu¹

¹Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

Received: 2025-11-17, Accepted: 2026-01-24, <https://doi.org/10.5564/mjag.v12i1.5191>

*Corresponding author: dolgormaa@iag.ac.mn 0009-0007-6955-5943

Abstract

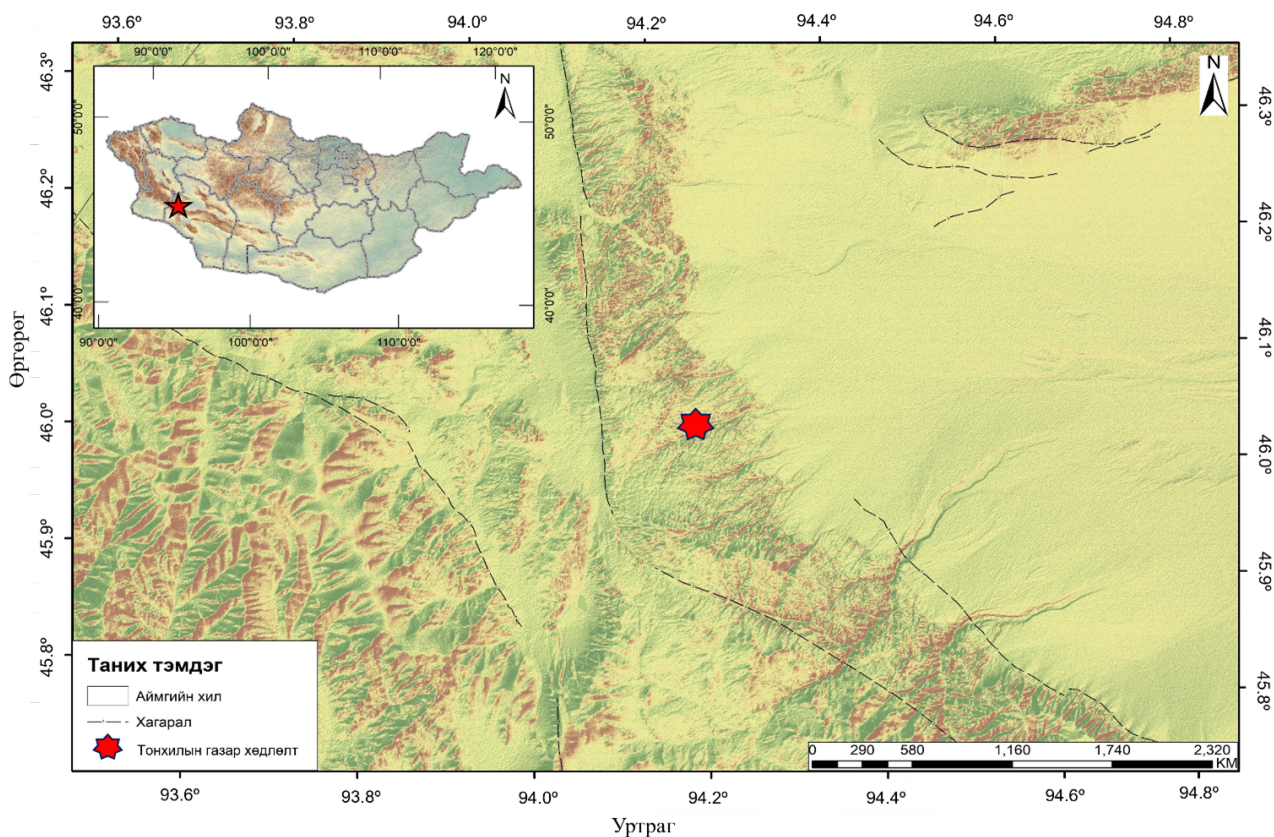
On March 20, 2020, at 11:03:12 a.m. local time (UTC+8), an earthquake with a magnitude of M_L 6.0 occurred in Tonkhil soum, Govi-Altai province, located in western Mongolia. The event was strongly felt across the western provinces and represents the largest earthquake in the region since the Takhiin Shar earthquake (July 4, 1974, $M = 7.0$). According to the National Data Center, approximately 1,000 aftershocks were recorded in the epicentral area during 2020. Following the mainshock, seven temporary seismic stations were deployed for a period of three months to monitor the increased seismic activity. The data collected from these mobile stations were processed automatically to detect and locate aftershocks. Phase picking was carried out using the PhaseNet software, which is based on a convolutional neural network deep learning approach. Phase association and event location were performed using the GaMMA algorithm, based on a Gaussian mixture model. As a result of the automated processing workflow, a total of 4,550 earthquake hypocenters were identified. To investigate the spatial distribution of seismicity relative to the fault geometry, seven cross-sections were constructed. The depth distribution of earthquakes was analyzed for each section, and interpretation focused on two sections exhibiting the most significant seismic activity. The first active zone, Section E-E', is characterized by a high density of low-magnitude, repetitive earthquakes, accounting for approximately 60% of the total recorded events. In terms of depth distribution, 98% of the earthquakes in this section occurred at depths shallower than 18 km. The second notable active zone, Section C-C', exhibits seismic activity aligned along the fault plane. With respect to depth distribution, 95% of the earthquakes identified in this section occurred at depths ranging from 10 to 18 km.

Keywords: Convolutional neural network, Gaussian mixture model, automatic processing, mobile station

1. Удиртгал

2020 оны 3 дугаар сарын 20-ний 11:03:12 цагт Говь-Алтай аймгийн Тонхил суманд магнитуд нь M_L 6.0-тай газар хөдлөлт болсон. Энэхүү газар хөдлөлт нь Тахийн шарын (1974/7/4 $M = 7.0$) хүчтэй газар хөдлөлтөөс хойш энэ бүс нутагт тохиосон хамгийн хүчтэй хөдлөлт юм. Өмнө нь

энэ бүс нутагт идэвхжилийн судалгааны ажил хийгдэж байгаагүй учраас газар хөдлөлтийн идэвхжилийг бүртгэх, хянах зорилгоор 7 нүүдлийн станцыг 3 сарын хугацаанд суурилуулан ажиллуулсан. Газар хөдлөлийн мэдээлэл боловсруулалт нь маш их цаг болон олон хүний оролцоо шаардсан ажил байдаг. Сүүлийн жилүүдэд дэлхий



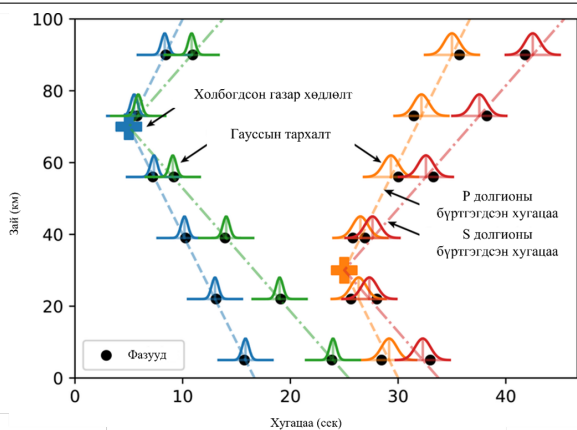
Зураг 1. Судалгааны талбайн байршил.

дахинаа боловсруулагчийн гараар хэмжих фаз авалтыг аль болох багасгах болон богино хугацаанд чанартай, нарийвчилсан мэдээллийг бүрдүүлэх зорилгоор автомат бодолтыг ашиглаж байна. Бидний хувьд хүчтэй хөдлөлтийн дараа тухайн бүсэд олон тооны давталт хөдлөлт бүртгэгдсэн тохиолдолд газар хөдлөлтийн идэвхжилийг бүртгэх, хянах зорилгоор нүүдлийн станц суурилуулан ажиллуулж байна. Нүүдлийн станц суурилуулсан зарим газрууд нь интернет сүлжээнд холбогдоогүй учир мэдээллийг шууд горимоор хүлээн авах боломжгүй байдаг ба бид офлайн буюу хард дискэн дээр тэдгээр мэдээллийг хуримтлуулан авчирсан. Нүүдлийн станцын дээрх олон сарын хуримтлагдсан мэдээллийг нөхөн гараар боловсруулах боломжгүй учир автомат боловсруулалтаар энэхүү асуудлыг шийдэх зорилгоор уг судалгааны ажлын эхлүүлсэн. Бидний судалгааны талбай нь Тонхилын хүчтэй газар хөдлөлтийн төвөөс 50 километрийн радиус бүхий газар нутгийг сонгосон (Зураг. 1). Нүүдлийн станцуудыг байршуулахдаа гол хөдлөл-

тийг тойруулан гурвалжин хэлбэртэйгээр давталт хөдлөлүүдийг алдахгүй байхыг бодолцон хоорондоо 10–30 километрийн зайтайгаар суурилуулсан. Энэ судалгааны ажил нь автомат бодолтыг мэдээлэл боловсруулалтад ашиглах боломжтойг баталсан судалгааны ажил болсон.

2. Судалгааны арга зүй

Бид хиймэл мэдрэлийн сүлжээнд суурилсан гүн сургалтын арга зүй болон Гауссын холимог загвар дээр тулгуурлан гаргасан фаз танилтын арга зүйг ашиглан тус судалгааны ажлыг хийсэн. Хиймэл мэдрэлийн сүлжээнд суурилсан гүн сургалтын арга зүй нь P болон S долгионуудыг аль алиныг нь хэмжилт хийдэг, станцын гурван сувгийн дохиог нэгэн зэрэг боловсруулж, P болон S фазуудыг өндөр нарийвчлалтайгаар тодорхойлж чаддаг (Zhu & Beroza, 2019). Энэхүү аргаар олон тооны газар хөдлөлүүдийг богино хугацаанд боловсруулах чадвартай бөгөөд шуугианаас фазыг алдалгүй илрүүлдэг. Мөн хүний оролцоог багасгах давуу талтай.

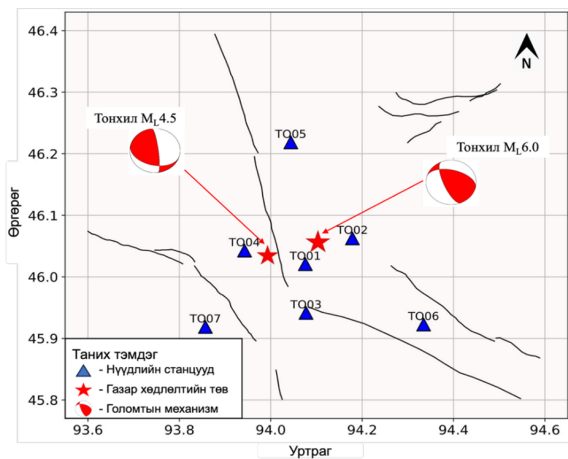


Зураг 2. Гауссын холимог загвар (Gaussian Mixture Model).

Гауссын холимог загвар дээр тулгуурлан гаргасан фаз танилтын арга нь газар хөдлөлийн долгионууд станцад бүртгэгдсэн хугацаануудыг нэгтгэж хэдэн голомтоос ялгарсан эсэхийг магадлан, газар хөдлөлийг тодорхойлох зорилготой юм (Zhu et al., 2022). Гауссын тархалтуудыг онолын фазын бүртгэгдсэн хугацаа болон далайцын утгуудыг тооцоолон загварчилсан бөгөөд доорх зураг дээр хоёр газар хөдлөлтийн төвийг “+” тэмдэглэгээгээр тэмдэглэсэн байна (Зураг. 2). Хоёр эх үүсвэрээс гарах фазын тархах хугацааг онолын хувьд тооцоолон тасархай зураасаар тэмдэглэсэн ба тухайн фаз бүрийн тархах магадлалыг мөн тооцоолон гаргадаг байна. Өөрөөр хэлбэл бодит хэмжилтийн утга болон онолын хэмжилтийн утгууд нь хоорондоо хэр зөрүүтэй байна гэдгээр магадлалыг тооцоолдог. Фазуудыг нэгтгэн газар хөдлөлтийн төвийг тодорхойлохдоо Expectation–Maximization (EM) алгоритмыг ашигладаг. EM алгоритм нь долгион тус бүрийн бүртгэгдсэн хугацаа болон далайцын хэмжилтийн утган дээр тулгуурлан тухайн газар хөдлөлийн төвийг тооцоолон гаргадаг (Зураг. 2).

3. Мэдээллийн сан бүрдүүлэлт

Тонхилын хүчтэй газар хөдлөлтийн дараа газар хөдлөлтийн идэвхжилийг бүртгэх, хянах зорилгоор 7 нүүдлийн станцыг 3 сарын хугацаанд суурилуулан ажиллуулсан. Нүүдлийн станцуудын мэдээллийг хиймэл мэдрэлийн сүлжээнд суурилсан гүн сургалтын ар-



Зураг 3. Тонхилын нүүдлийн станцууд, гол хөдлөлт болон давталт хөдлөлтийн голомтын механизм.

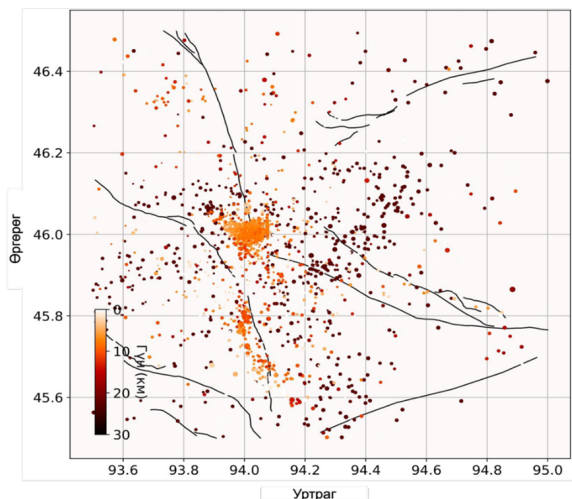
га зүйг ашиглан Phasenet программ хангамжаар фаз авалтыг хийсэн. Гауссын холимог загвар дээр тулгуурлан гаргасан Gamma программ хангамжаар фазыг нийлүүлэн мэдээлэл боловсруулалтыг хийсэн. Автомат мэдээлэл боловсруулалтаар 4550 газар хөдлөлийн төвийг тодорхойлсон (Зураг. 3).

ҮМТ-ийн мэдээллийн сангийн мэдээллээр дээрх газар хөдлөлтийн дараах давтан хөдлөлүүдээс хамгийн хүчтэй нь 2020 оны 3-р сарын 23-нд магнитуд M_L 4.5-тай давтан хөдлөлт болсон байна. ҮМТ-с өөрсдийн станцуудыг ашиглан голомтын механизмыг тодорхойлсон (Ganzorig, 2022). Тонхилын газар хөдлөлтийн хагарлын төрөл нь босоо шилжилт зонхилсон (reverse), 1974 оны Тахийн шарын газар хөдлөлттэй ижил голомтын механизмтай тодорхойлогдсон. Харин магнитуд M_L 4.5-тай давтан хөдлөлтийн хувьд хагарлын төрөл нь баруун гарын хэвтээ шилжилт (right-lateral strike-slip) гэж тодорхойлсон байна (Зураг. 3).

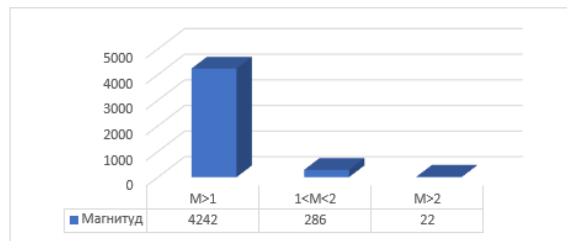
4. Үр дүн

Нүүдлийн станцын мэдээллээр автомат бо-долтын үр дүнгээр нийт газар хөдлөл 4550 тодорхойлогдсон байна (Зураг. 4).

Тодорхойлогдсон хөдлөлүүдийг магниту-даар нь ангилж авч үзвэл нийт хөдлөлийн 94.2% нь магнитуд 1-с бага газар хөдлөлүүд байна. Магнитуд 2-с дээш 22 газар хөдлөлт бүртгэгдсэн байна (Зураг. 5).



Зураг 4. Автомат бодолтын үр дүнгээр гаргасан төвийн тархалтын зураг.



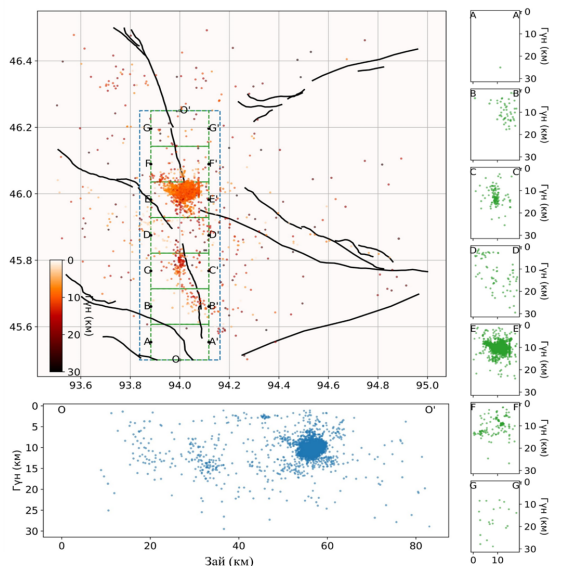
Зураг 5. Магнитудын ангилалын график.

Бид хагарлын дагуу 7 хөндлөн зүсэлт хийн зүсэлт бүрийн гүний тархалтыг гаргасан. Мөн нийт бүртгэгдсэн газар хөдлөлтүүдийн гүний тархалтын зургийг гаргасан. Үүнээс харахад гүний тархалт нь 30 километрт тархсан нь харагдаж байна (Зураг. 6). Дээрх зургаас харахад газар хөдлөлийн идэвхжил өндөртэй 2 хэсэг байсан.

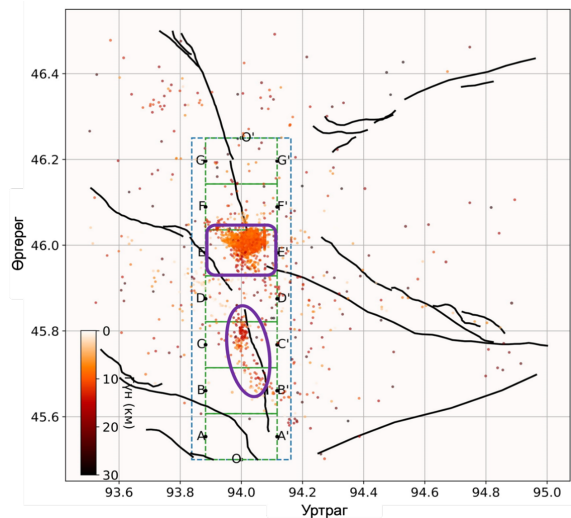
1. Section E - E' хувьд хагарлуудын огтлолд ихээхэн эвдрэл явагдсаны улмаас сул хүчтэй олон тооны давтан хөдлөл явагдсан нь харагдаж байна.
2. Section C - C' хувьд хагарлын хавтгайн дагуу идэвхжил ажиглагдсан байна.

5. Дүгнэлт

Автомат мэдээлэл боловсруулалтаар 4550 газар хөдлөлт тодорхойлсон байна. Үр дүнгийн зургаас харахад хөдлөлийн идэвхжил өндөртэй 2 хэсэг байсан (Зураг. 7). Энэхүү



Зураг 6. Хөндлөн зүсэлт болон гүний тархалтын зураг.



Зураг 7. Автомат бодолтын үр дүнгээр гаргасан төвийн тархалтын зураг.

хэсгүүдэд нийт газар хөдлөлийн 90% тодорхойлогдсон байсан учраас дүгнэлтийг хийсэн. Бусад хэсгүүд дээр газар хөдлөл идэвхжил ажиглагдаагүй учраас дүгнэлт хийгээгүй болно.

Эхний идэвхжил буюу Section E - E' нь сул хүчтэй олон тооны давталт хөдлөлт болсон хагарлуудын уулзвар хэсэгт болсон нь анхаарал татсан. Энэ хэсэгт нийт хөдлөлийн 60% тодорхойлогдсон байна. Гүний тархалтын хувьд энд тодорхойлогдсон газар хөдлөлүүдийн 98% нь 18 километр ба түүнээс дотогш гүнтэй газар хөдлөлүүд бүртгэгдсэн байна (Зураг. 6).

Хоёр дахь анхаарал татсан идэвхжилийн буюу Section C - C' нь хагарлын хавтгайн дагуу идэвхжил ажиглагдсан (Зураг. 7), гүний тархалтын хувьд энд тодорхойлогдсон газар хөдлөлүүдийн 95% нь 10-18 километрийн гүнтэй газар хөдлөлүүд бүртгэгдсэн байна (Зураг. 6).

Талархал

Энэ судалгааны ажлыг Одон орон, геофизикийн хүрээлэнгийн батлагдсан суурь судалгааны үндсэн чиглэлийн хүрээнд хийсэн болно. Тус судалгааг санхүүжүүлсэн Одон орон, геофизикийн хүрээлэнд талархаж байна. Мөн газар хөдлөлт бүртгэх нүүдлийн станцуудыг суурилуулах, мэдээлэл авах, засварлах, буулгах ажлуудыг хийсэн ООГХ-ийн Газар хөдлөл судлалын салбарын Техник технологийн лабораторийн эрдэм шинжилгээний ажилтнуудад талархал илэрхийлье.

Ашигласан номзүй (References)

- Ganzorig, D., 2022. Хүчтэй хөдлөлтийн механизмын мэдээллийн сан.
- Zhu, W. & Beroza, G. C., 2019. Phasenet: A deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method, *Geophysical Journal International*, 216(1), 261–273, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy423>.
- Zhu, W., McBrearty, I. W., Mousavi, S. M., Ellsworth, W. L., & Beroza, G. C., 2022. Earthquake phase association using a bayesian gaussian mixture model, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(5), e2021JB023249, <https://doi.org/10.1029/2021JB023249>.