



Determining the local earthquake origin time and V_p/V_s ratio using the Wadati diagram

Uyanga Bayaraa^{1*}, Munkhsaikhan Adiya¹, and Daariimaa Badarch¹

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

Received: 2025-11-17, Accepted: 2025-12-25, <https://doi.org/10.5564/mjag.v12i1.5204>

*Corresponding author: uyanga.b@iag.ac.mn 0009-0002-3236-4135

Abstract

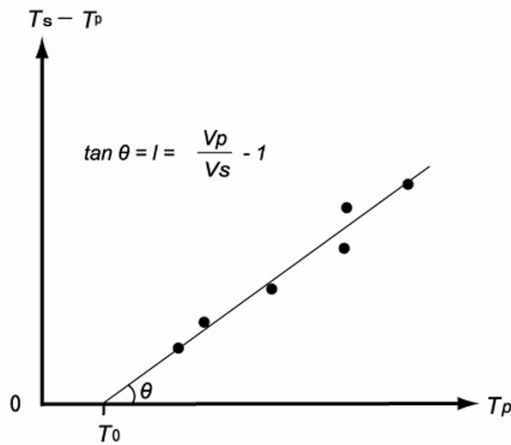
Seismological research encompasses a wide range of studies related to earthquakes. Determining the origin time, spatial distribution, and seismic velocity ratios of earthquakes occurring in a specific region, as well as compiling an earthquake database, provides fundamental and essential information for evaluating the spatial occurrence, recurrence patterns, and seismic hazards of that region. In this study, the origin times and velocity ratios of earthquakes were determined using the Wadati diagram method. The analysis was based on the recorded arrival times of P-waves and S-waves at seismic stations for 371 earthquakes that occurred within the territory of Mongolia and surrounding border regions. The results of the study indicate that the average seismic velocity ratio (V_p/V_s) was calculated to be 1.72.

Keywords: Wadati diagram, velocity ratio (V_p/V_s), earthquake origin time, azimuthal gap

1. Удиртгал

Монгол орны хэмжээнд ажиллаж буй газар хөдлөлт бүртгэх станцын сүлжээнд бүртгэгдэж буй бүх газар хөдлөлийн мэдээллийг ООГХ-ын Үндэсний Мэдээллийн Төвд өдөр тутмын мэдээлэл боловсруулалтын ажлын хүрээнд боловсруулдаг. Ингэхдээ газар хөдлөл тус бүрийн хувьд тухайн газар хөдлөлтийн эхэлсэн хугацаа (t_0), газар зүйн байршил (уртраг λ , өргөрөг ϕ), хүч (магнитуд) болон гүн (h , км) зэргийг тодорхойлон гаргаж газар хөдлөлийн мэдээллийн санг бүрдүүлдэг. Энэ нь тухайн бүс нутагт газар хөдлөлт болох орон зай, давтагдал, эрсдлийг үнэлэх анхдагч бөгөөд чухал мэдээлэл болдог. Харин сейсмик хурдны харьцаа (V_p/V_s) нь сейсмологийн судалгаанд өргөнөөр хэрэглэгддэг сейсмик хурдны загварын гол па-

раметр юм. Газар хөдлөлийн эхэлсэн хугацаа болон хурдны харьцаа (V_p/V_s)-г тодорхойлдог хамгийн хялбар арга бол “Вадати диаграмм”-ын арга (Wadati & Oki, 1933) юм. Энэ арга нь зөвхөн P болон S долгионы газар хөдлөлт бүртгэх станцад бүртгэгдсэн хугацааг ашиглан газар хөдлөлтийн эхэлсэн хугацаа, газар хөдлөлтийн голомтын зай, сейсмик долгионы хурдны харьцаа (V_p/V_s) зэргийг тодорхойлдог. Цаашилбал, бүс нутгийн хэмжээнд Пуассоны харьцааг тодорхойлох (Baasanbat, 2022), мөн царцдас болон дээд мантийн бүтэц (Ukawa & Fukao, 1981), сейсмик долгионы хурдны өөрчлөлт (Aggarwal et al., 1973)-ийн судалгаанд ашигладаг. Иймд энэ судалгааны ажлаар “Вадати диаграмм” аргыг ашиглан Монгол орны нутаг дэвсгэр болон хил орчмын бүс нутагт болсон 371 газар хөдлөлтийн эхэлсэн хуга-



Зураг 1. Вадати диаграмм.

цаа (T_0) болон сейсмик хурдны харьцааг (V_p/V_s) тодорхойлох ажлыг хийсэн.

2. Судалгааны арга зүй

Профессор Kiyoo Wadati нь мантийн үе давхаргаар тарах тууш (P) болон (S) хөндлөн долгионы хурдны загварыг гаргах явцдаа “Вадати диаграмм”-аар төв нь тодорхой бус газар хөдлөлтийн эхэлсэн хугацаа болон хурдны харьцааг (V_p/V_s) тооцоолох боломжтой болохыг харуулсан (Frohlich, 1987). Энэхүү судалгааны ажлаа Nobuo Hurukawa-гийн 2015 онд хэвлүүлсэн, “Ойрын газар хөдлөлтийн практик анализ” гарын авлагад суурилан хийсэн бөгөөд Вадати диаграммыг дараах байдлаар тодорхойлсон байдаг. Тухайн нэг газар хөдлөлтийн “ P долгионы бүртгэгдсэн хугацаа” болон “ S болон P долгионы бүртгэгдсэн хугацааны зөрүү”-гийн шугаман хамаарлыг (Зураг. 1) Вадати диаграмм гэнэ (Hurukawa, 2008).

Үүнд: $T_p - P$ долгионы бүртгэгдсэн хугацаа, $(T_s - T_p) - P$ болон долгионы бүртгэгдсэн хугацааны зөрүү, T_0 газар хөдлөлт эхэлсэн хугацаа, l - шулууны налуу, θ налуугийн өнцөг

“Вадати диаграмм” аргаар газар хөдлөлтийн эхэлсэн хугацаа болон хурдны харьцааг дараах байдлаар тодорхойлно.

Газар хөдлөлтийн эхэлсэн хугацаа T_0

Нэг голомтоос тархсан P болон S долгионууд нь өөр өөр хурдаар тархдаг. Иймд га-

зар хөдлөлтийн эхэлсэн хугацааг ($S - P$) хугацааны зөрүү нь тэг болох үед T_p тэнхлэгийн огтлолоос тооцоолдог. P долгионы бүртгэгдсэн хугацаа болох T_p , S болон P долгионуудын бүртгэгдсэн хугацааны зөрүү болох, шулууны налуу -ээр газар хөдлөлтийн эхэлсэн хугацааг дараах тэгшитгэлээр илэрхийлнэ (Тэг. 2):

$$T_0 = T_p \frac{T_{sp}}{l} \tag{1}$$

Олон станцид бүртгэгдсэн тохиолдолд, T_0 -ыг хамгийн бага квадратын арга буюу олон тооны цэгүүд (x, y) өгөгдсөн үед тэдгээрт хамгийн сайн тохирох дундаж шулуун татаж, шулууны тэгшитгэлийг бичиж болно (Тэг. 2). Энд T_{p_i} , T_{sp_i} , n нь станц дахь тус бүрийн хугацаанууд мөн нийт станцуудын тоог илэрхийлнэ.

$$\sum_{i=1}^n \left[T_0 - \left(T_{p_i} - \frac{T_{sp_i}}{l} \right) \right]^2 \tag{2}$$

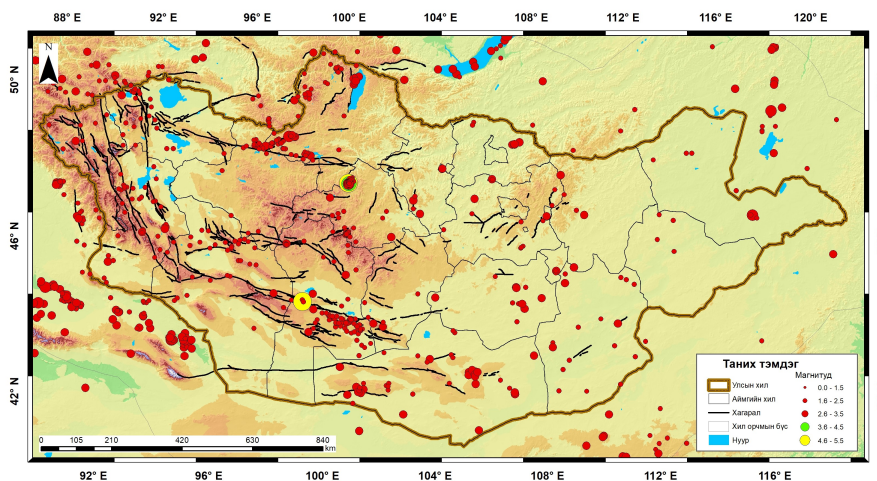
Энд l -г тогтмол гэж үзээд -ыг хялбар олж болох ба доорх тэгшитгэл нь бүх станцын -ын дунджаар ерөнхий ганц T_0 -ыг гаргана.

$$T_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(T_{p_i} - \frac{T_{sp_i}}{l} \right) \tag{3}$$

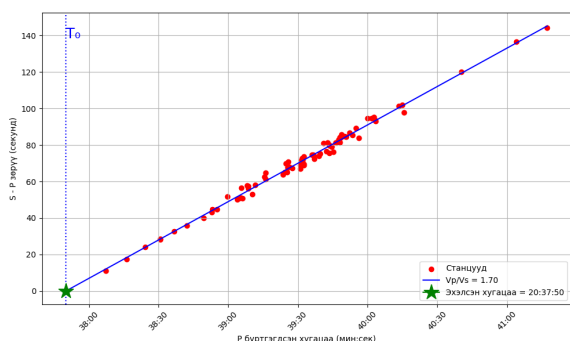
Хурдны харьцаа V_p/V_s

“Вадати диаграмм”-ыг байгуулаад түүний (l) налууугаас хурдны харьцааг тооцоолдог. Ингэхдээ:

-Хэрэв бүртгэгдсэн фазын тоо цөөн бол энд $l = \frac{V_p}{V_s} - 1/V_p/V_s$ буюу хурдны харьцааг дэлхийн дунджаар 1.73 гэж үзээд l налуу дагуу шулуун татна. -Харин бүртгэгдсэн фазын тоо хангалттай, фаз хэмжилт чанартай байх үед “Вадати диаграмм”-ыг фазын хэмжилтийн утгуудаар шууд байгуулж түүний дундаж шулууны налуугийн өнцгөөс сейсмик хурдны харьцааг тооцоолно (Зураг. 1). Нэгэн төрлийн орчинд долгион тархах буюу долгионы тогтмол хурд дээр үндэслэдэг “Вадати диаграмм” арга нь тухайн газар хөдлөлтийн дундаж хурдны харьцааг нь тодорхойлдог (Pawelec et al., 2016).



Зураг 2. Судалгаанд ашигласан газар хөдлөлтийн тархалтын зураг.



Зураг 3. 2024 оны 11-р сарын 09-ний өдрийн магнитуд M4.7-той газар хөдлөлтийн вадати диаграмм.

3. Мэдээллийн сан бүрдүүлэлт

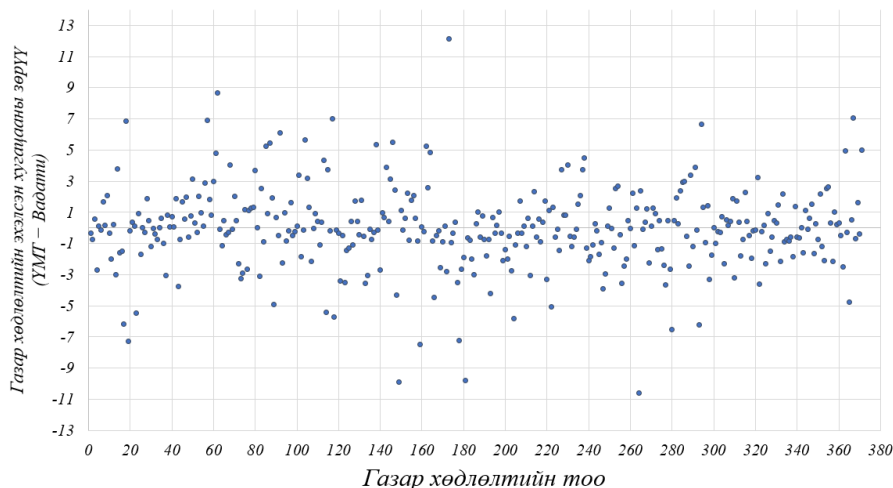
Газар хөдлөл судлалын салбарын Үндэсний Мэдээллийн Төвийн мэдээллийн сангаас дараах 3 өдрийн газар хөдлөлтийн мэдээллийг сонгон авч ашигласан (Зураг. 2). Үүнд:

- 2024 оны 11 дүгээр сарын 9-ны өдөр. 1957 оны сүйрүүлэх хүчтэй газар хөдлөлтийн голомтын бүс нутаг болох Говь-Алтайн идэвхтэй хагарлын дагуу буюу Баянхонгор аймгийн Баянцагаан сумын нутагт магнитуд нь M4.7-той газар хөдлөлт болсон.
- 2024 оны 11 дүгээр сарын 27-ны өдөр. Тус сарын хамгийн хүчтэй газар хөдлөлт буюу Архангай аймгийн Жаргалант сумын нутагт магнитуд нь M5.5-тай газар хөдлөлт болсон.
- 2024 оны 12 дугаар сарын 31-ны өдөр.

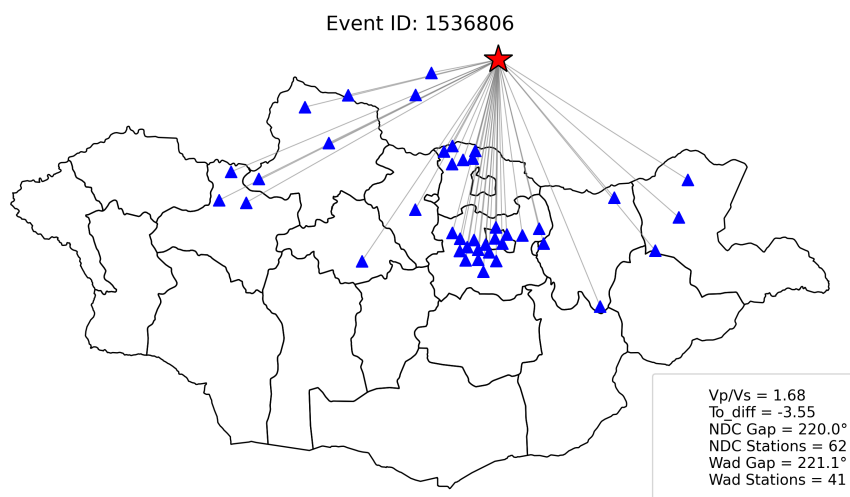
Монгол орны газар хөдлөлтийн идэвхжилт харьцангуй багатай гэж үздэг зүүн бүс нутагт буюу Дорнод аймгийн Матад сумын нутагт магнитуд нь M3.4-тэй газар хөдлөлт болсон: Үүнээс гадна эдгээр өдрүүдэд нийт 796 газар хөдлөлт болон уул уурхайн тэсэлгээ бүртгэгдсэн байна (Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences, 2024).

Судалгааны ажилд ашиглах мэдээллийн санг бүрдүүлэхдээ 3 болон түүнээс дээш станцад (агтау – сүлжээ станцуудыг нэг станц гэж тооцсон) болон долгион бүртгэгдсэн байх шалгуурыг тавьсан. Ингэхэд ҮМТ-ийн мэдээллийн сангаас 3 хоногийн туршид болсон нийт 796 газар хөдлөлтийн мэдээллээс уг шалгуурт нийцсэн 371 газар хөдлөлтийг сонгон авсан. Эдгээр 371 газар хөдлөлтийн хувьд: -Магнитуд нь 1 хүртэлх ($Ml \leq 1.5$) газар хөдлөлт 181 удаа, -Магнитуд нь 2-той ($1.5 < Ml \leq 2.5$) газар хөдлөлт 177 удаа, -Магнитуд нь 3-тай ($2.5 < Ml \leq 3.5$) газар хөдлөлт 10 удаа, -Магнитуд нь 4-тэй ($3.5 < Ml \leq 4.5$) газар хөдлөлт 1 удаа, -Магнитуд нь 5-тай ($4.5 < Ml \leq 5.5$) газар хөдлөлт 2 удаа болсон байна.

Судалгааны ажлаар эдгээр газар хөдлөлт тус бүрийн бүртгэгдсэн станцын нэр, станцад бүртгэгдсэн хугацаа, тэдгээрийн фазын төрөл бүхий мэдээллийг ашиглан “Вадати диаграмм” аргаар газар хөдлөлтийн T_0 болон Vp/Vs -г тооцоолдог программыг Python программын хэлийг ашиглан бичиж,



Зураг 4. ҮМТ-ийн болон “Вадати диаграмм”-аар тодорхойлсон газар хөдлөлтийн эхэлсэн хугацааны зөрүү



Зураг 5. Azimuthal gap-ын утга нь их газар хөдлөлтийн (Event ID 1536806) жишээ.

тодорхойлсон.

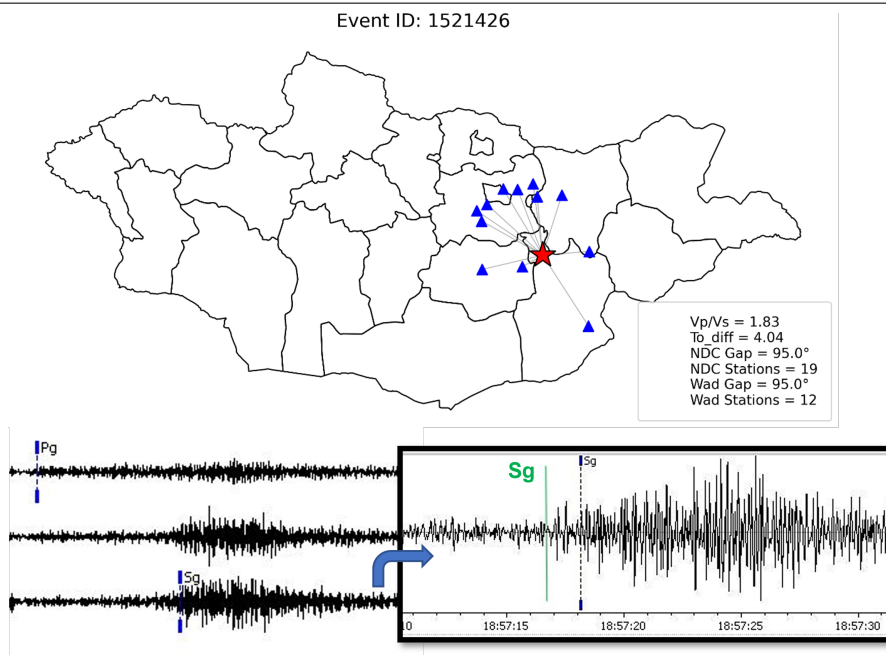
4. Үр дүн

Сонгогдсон газар хөдлөлт бүрийн хувьд Вадати диаграммыг байгуулсан. Жишээ болгож 2024 оны 11-р сарын 09-ний өдөр Говь-Алтайн хагарлын бүс нутагт болсон магнитуд нь М4.7-той газар хөдлөлтийн Вадати диаграммыг Зураг. 3-т харуулав.

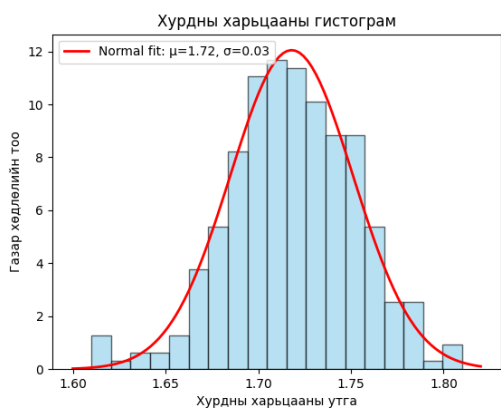
Олон улсад мөрдөгддөг стандартаар газар хөдлөлтийн эхэлсэн хугацааны алдааны хүрээ нь 3-5 секунд байх боломжтой гэж үздэг. Тиймээс ҮМТ-ийн болон “Вадати диаграмм” аргаар тодорхойлсон газар хөдлөлтийн эхэлсэн хугацааны зөрүү нь 3.00 секундээс их гарсан 70 газар хөдлөлтийг ялган авч (Зу-

раг. 4), мэдээлэлд шинжилгээ хийхэд:

1. Эдгээр 70 газар хөдлөлтийн 50 орчим газар хөдлөлт нь Монгол улсын хилийн цаана болсон хөдлөлтүүд буюу газар хөдлөлтийг бүртгэсэн станцууд нь газар хөдлөлтийн голомтоос хол зайтай байв (Зураг. 5).
2. Газар хөдлөлтийг бүртгэсэн станц хоорондын хамгийн их өнцөг /azimuthal gap/-ийн утга нь эдгээр 70 газар хөдлөлийн ихэнхид буюу 82.8%-д нь 160° -аас их байна. Уг параметрын утга 160°-аас их байгаа нь эдгээр газар хөдлөлтийн төвийг тодорхойлоход ашигласан станцууд нь тухайн газар хөдлөлтийнхөө нэг талд нь байгааг илтгэж байна (Зураг. 5).



Зураг 6. Фаз буруу авсан газар хөдлөлтийн (Event ID 1521426) жишээ



Зураг 7. Вадати диаграммаар тодорхойлсон хурдны харьцааны түгэлт.

3. Үлдсэн 18.2% буюу 15 газар хөдлөлт нь хэдийгээр “azimuthal gap” нь 160°-аас бага, бүртгэсэн станц нь эпицентрээс бага зайтай боловч газар хөдлөлтийн *P* болон *S* долгионы фазыг буруу хэмжсэн байна (Зураг. 6).

Судлаачид “Вадати диаграмм” аргаар тооцоолсон зарим үр дүн (тухайлбал хурдны харьцаа) нь станцын тархалт хязгаарлагдмал байх, станц хоорондын “azimuthal gap”-ын утга их байх зэргээс шалтгаалан алдааны хязгаар ихтэй байдаг тухай тэмдэглэсэн байдаг (Eaton, 2018). Иймд эдгээр 70 газар хөдлөлтийн мэдээллийг хурдны харьцааны дундаж утгыг тооцоолоход алдааны хязгаа-

рыг багасгах зорилгоор ашиглаагүй болно.

ҮМТ-ийн болон “Вадати диаграмм” аргаар тодорхойлсон газар хөдлөлтийн эхэлсэн хугацааны зөрүү нь 3.00 секундээс бага 301 газар хөдлөлтийн хурдны харьцааг тооцоолоход 1.61 - 1.81-ын хооронд байна. Зураг. 7-д хурдны харьцааны түгэлтийг харуулсан бөгөөд хурдны харьцааны дундаж утга нь 1.72, стандарт хазайлт нь 0.03 байна.

5. Дүгнэлт

Энэхүү судалгааны ажлаар 2024 оны 11 дүгээр сарын 9, 27 болон 12 дугаар сарын 31-ны өдрүүдэд болсон нийт хөдөлтүүдээс тухайн газар хөдлөлт нь 3 болон түүнээс дээш станцид бүртгэгдсэн 371 хөдлөлтийн хувьд газар хөдлөлтийн эхэлсэн хугацааг “Вадати диаграмм” аргаар тодорхойлж, ҮМТ-ийн мэдээлэл боловсруулалттай харьцуулав. “Вадати диаграмм” аргаар тодорхойлсон газар хөдлөлт эхэлсэн хугацаа нь ҮМТ-ийн мэдээлэл боловсруулалтын үр дүнгээс 3 секундээс илүү зөрүүтэй хөдлөлтүүдэд анализ хийхэд тухайн газар хөдлөлтийн байршил болон станцын хоорондох зай, азимутын хамгийн их өнцөг, *P* болон *S* долгионы бүртгэгдэх хугацааг зөв, нарийвчлалтай тодорхойлсон эсэх нь судалгааны үр дүнд шууд нөлөөлж

байна. Өөрөөр хэлбэл эдгээр шалгуур үзүүлэлтүүдэд “Вадати диаграмм” арга нь илүү мэдрэг болох нь харагдаж байна. Судалгааны ажлын үр дүнгээр хурдны харьцааны дундаж утгыг 1.72 гэж тодорхойлов. Энэ нь Монгол орны газар хөдлөлтийн судалгаа, сейсмик хурдны загвар, газар хөдлөлтийн төвийг тодорхойлоход хэрэглэгддэг сейсмик хурдны харьцаа болох 1.73 утгатай 99% тохирч байна (Baljinyam et al., 1975). Цаашид “Вадати диаграмм” аргыг ашиглахдаа мэдээллийн сангийн шалгуур үзүүлэлтээ нарийвчлах шаардлагатай. Мөн илүү нарийн 3 хэмжээст хурдны загварт уялдуулах, мөн хурдны бүтэцээрээ ялгаатай бүсүүдэд ашиглаж түүний давуу болон сул талуудыг гүнзгий судлах боломжтой.

Ашигласан номзүй (References)

- Aggarwal, Y. P., Sykes, L. R., Armbruster, J., & Sbar, M. L., 1973. Premonitory changes in seismic velocities and prediction of earthquakes, *Nature*, **241**(5385), 101–104, <https://doi.org/10.1038/241101a0>.
- Baasanbat, T., 2022. V_p/v_s ratio of seismic velocities in the upper crust beneath the khuvs gul region, *Geological Issues*, **21**(1), in Mongolian.
- Baljinyam, I., Munkhoo, A., Tsembel, B., et al., 1975. Seismology of mongolia, *Institute of Physics and Technology, Mongolian Academy of Sciences*, in Mongolian.
- Eaton, D. W., 2018. *Passive seismic monitoring of induced seismicity: Fundamental principles and application to energy technologies*, Cambridge University Press.
- Frohlich, C., 1987. Kiyoo wadati and early research on deep focus earthquakes, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **92**(B13), 13777–13788, <https://doi.org/10.1029/JB092iB13p13777>.
- Hurukawa, N., 2008. Practical analyses of local earthquakes, *Tsukuba, Japan: International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IISEE) Building Research Institute*.
- Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences, 2024. Annual report on research and activities, Tech. rep., Institute of Astronomy and Geophysics, MAS, Ulaanbaatar, in Mongolian.
- Pawelec, I., Szafranski, D., & Eisner, L., 2016. Revision of wadati method for v_p/v_s determination in layered media, in *SEG International Exposition and Annual Meeting*, pp. SEG–2016, SEG.
- Ukawa, M. & Fukao, Y., 1981. Poisson’s ratios of the upper and lower crust and the sub-moho mantle beneath central honshu, japan, *Tectonophysics*, **77**(3–4), 233–256, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90155-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90155-8).
- Wadati, K. & Oki, S., 1933. On the travel time of earthquake waves.(part ii), *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **11**(1), 14–28.