

The relationship between geological features and phase tensor: examples from Mogod and Tsenker study areas

Enkhzul Bayartogtokh¹ and Batmagnai Erdenechimeg¹

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

*enkhzul@iag.ac.mn,

Received: 2024-10-19, Accepted: 2024-11-10, <https://doi.org/10.5564/mjag.v11i1.4191>

Abstract

The magnetotelluric phase tensor contains information about the directionality and dimensionality of the study region's geo-electrical structure. In this context, the phase tensor controls geological faults or fractured zones and homogeneities of the lithology. Although the phase tensor is commonly used for magnetotelluric analysis, it is still poorly introduced in Mongolian case studies. Therefore, this paper introduces the theoretical concepts of the phase tensors and their applications in the Tsenkher and Mogod geothermal regions. For this study, we used magnetotelluric data sets from the previously conducted measurements in 2019 and 2022 at the Tsenkher region and newly measured data at the Mogod region in 2024. With this study, we re-analyzed all observed data with advanced approaches to improve data quality, resulting in smooth and clean magnetotelluric impedance tensors being obtained. The impedance tensors were used to estimate the real-valued distortion-free phase tensor at every unique measurement site. We calculate the geo-electrical strike direction from the phase tensor with the Swift angles at every site and dimensionality. As a result, the phase tensors represented the geo-electrical direction and dimension that indicates geological faults and the voluminousness of the massive rocks. Another advantage of this study is providing a developed MATLAB-based code to calculate and plot the phase tensor as a tool to support geoscientists for their future study. In the end, based on the implementation of this research, we conclude that magnetotelluric phase tensor could be used as an efficient tool for geological interpretation for geoscientific studies in the country.

Keywords: Impedance tensor, Faults, geoelectric structure, inversion

1. Удиртгал

Магнетотеллурик (МТ) нь дэлхийн гүний үе давхаргуудын гео-цахилгаан (цахилгаан дамжуулах чадвар эсвэл эсэргүүцэл) шинж чанарыг тодорхойлох геофизикийн байгалийн үүсгүүрт цахилгаан соронзон арга юм. Ерөнхийдөө МТ хэмжилтийн үр дүнд бүртгэн авах үндсэн өгөгдөл нь импеданс тензор юм (Berdichevsky & Dmitriev, 2008). Импеданс тензор нь дэлхийн гео-цахилгаан тогтцын босоо ба хэвтээ чиглэлийн мэдээллүүдийг агуулах ба ихэвчлэн бүртгэн ав-

сан цахилгаан соронзон долгионы давтамжаас хамааран өөрчлөгдөх төлөөллийн эсэргүүцэл ба импедансийн фазын муруйгаар дүрслэгддэг (Simpson & Bahr, 2005). МТ-н импеданс тензор нь нэгэн төрлийн бус тогтцоор урсах цахилгаан гүйдэл бага гүний 3-D биет эсвэл топографикийн өөрчлөлт дээр тасрах үзэгдлээр бий болох цахилгаан цэнэгийн хуримтлалын улмаар төлөөллийн эсэргүүцлийн утга шилжилтэд ордог болох нь туршилтаар нотлогдсон байдаг (Groom & Bahr, 1992; Utada & Munekane, 2000;

Singer, 1992). Энэ төрлийн гальваник дисторшны шинж чанарыг тодорхойлох МТ-н фаз тензорыг (Caldwell et al., 2004) анх танилцуулсан. Цаашлаад (Booker, 2014) фаз тензорыг 3-D дэлхийн хувьд авч үзэж, энэ нь гео-цахилгаан тогтцын хэмжээс ба чиглэлийн мэдээллийг агуулж буйг баталсан бөгөөд 3-D дисторшны хамааралгүй МТ тандалтын тензор гэж дүгнэсэн байдаг. Иймд 3-D загварчлалын кодууд нь фаз тензорын инверсийг 3-D орчинд хийх хөгжүүлэлтүүд хийгдэж эхэлсэн (Kelbert et al., 2017). Монгол орны төвийн бүс нутагт хийгдсэн МТ судалгааны үр дүнд фаз тензорын анализыг зөвхөн 2-D шугамын дагуух цахилгаан эсэргүүцлийн загвар гарган авахын тулд геоцахилгаан страйк чиглэлийг тодорхойлох зорилгоор ашигласан (Käufel et al., 2020; Comeau et al., 2018). Мөн Batmagnai et al. (2019) нар Цэнхэрийн бүс нутагт хийсэн 4 цэгийн МТ хэмжилтийн үр дүнд тайлал хийхэд фаз тензор анализыг ашиглан орчны хэмжээсний дагуу мэдээлэл өгсөн байдаг. Гэсэн хэдий ч эдгээр судалгаануудад МТ фаз тензорын тодорхойлсон гүйцэтгэлийн талаар дэлгэрэнгүй авч үзээгүй ба геологийн тогтоцтой холбосон тодорхой тайлал хийгээгүй байдаг. Иймд энэ судалгааны ажлын хүрээнд зохиогчид МТ фаз тензорын физик ба математик агуулгыг тайлбарлах, түүний геологийн тогтоцтой хэрхэн холбогдох асуудлыг бодит өгөгдөл дээр авч үзэн тайлал хийх үндсэн зорилгууд дэвшүүлсэн. Судалгааны ажлын хүрээнд МТ фаз тензор түүнтэй холбоотой тооцоог МАТЛАБ программ дээр хийж гүйцэтгэсэн ба уг кодыг Архангай аймаг дахь Цэнхэр, Булган аймаг дахь Могодын халуун рашаан бүхий судалгааны талбайд хийсэн МТ хэмжилтийн өгөгдлийг ашиглан тооцоо хийсэн. Энэ өгүүлэлд МТ-н фаз тензорыг ашиглах үндэс, түүний математик томъёолол ба түүний программын гүйцэтгэл, Цэнхэр ба Могодын судалгааны талбайн үр дүнгүүдийг нэгтгэн дэлгэрэнгүй оруулсан. Цаашлаад судалгааны ажилд ашигласан фаз тензор анализын бүрэн кодыг GitLab сангаар дамжуулан нээлттэй ашиглахаар хавсаргасан. Зохиогчдын мэдлэгийн хүрээнд уг төрлийн судалгааны ажил нь Монгол орны хувьд анх удаа хийгдсэн ба судалгааны ажилд тулгуурлан МТ фаз тензорыг геошинжлэх

ухааны тайлалд нэгэн хэрэглэл болгон ашиглах боломжтой.

2. Судалгааны арга зүй

2.1. Импеданс ба фаз тензор

МТ-н хэмжилтээр байгалийн цахилгаан $E(r, t)$ соронзон $H(r, t)$ орны хугацааны өөрчлөлтийг бүртгэн авдаг. Гэсэн хэдий ч байгаль дээр явагдах цахилгаан соронзон индукцийн үзэгдэл нь тодорхой давтамжийн мужид явагдах тул үүсгүүр орны шинж чанарыг ойлгон физик хэмжигдэхүүнүүдийг үнэлэх зорилгоор МТ-н дүн шинжилгээг давтамжийн мужид хийдэг. Импеданс тензор Z цахилгаан орны хэвтээ E_h ба соронзон орны хэвтээ байгуулагчдын H_h хоорондох шугаман хамаарлаар илэрхийлэгдэнэ (1).

$$E_h(r, \omega) = Z(r, \omega, \rho) \cdot H_h(r, \omega) \quad (1)$$

Энд ω - өнцөг давтамж, ρ - хувийн эсэргүүцэл. МТ анхдагч өгөгдөл болох хугацааны цуваанаас импеданс тензор үнэлэх арга зүйг (Egbert & Booker, 1986) танилцуулсан ба зохиогчид уг арга зүйн талаар өмнөх судалгааны ажлуудад дэлгэрэнгүй авч үзсэн (Batmagnai & Sukhbaatar, 2017, 2016; Enkhzul & Batmagnai, 2021). Импеданс тензор нь үнэндээ хоёрдугаар эрэмбийн комплекс утгат тензор (2) бөгөөд үүний үндсэн диагоналийн элементүүд нь хэвтээ, хажуугийн диагоналийн элементүүд нь босоо чиглэлийн геоцахилгаан тогтцын мэдээллийг тус тус агуулдаг.

$$Z(r, \omega, \rho) = \begin{pmatrix} Z_{xx}(r, \omega, \rho) & Z_{xy}(r, \omega, \rho) \\ Z_{yx}(r, \omega, \rho) & Z_{yy}(r, \omega, \rho) \end{pmatrix} \quad (2)$$

2-н элемент бүрээс төлөөллийн эсэргүүцэл ρ_a ба импедансийн фаз ϕ -г (3, 4)-с тодорхойлно.

$$\rho_{a_{ij}} = \frac{1}{\omega \mu} |Z_{ij}| \quad (3)$$

$$\phi = \left(\frac{\text{Im}(Z_{ij})}{\text{Re}(Z_{ij})} \right) \quad (4)$$

МТ импеданс тензорын байгуулагчдаас тодорхойлсон төлөөллийн эсэргүүцлийн муруйн утгад хэмжилтийн цэгүүдтэй ойр буюу газрын

гадаргад ойрхон орших нэгэн төрлийн бус дамжуулагч биетүүд нөлөөлдөг. Энэ нь тэнд цэнэгийн хуримтлал үүссэнээс үүдэлтэй шилжилт ажиглагдах ба үүнийг статик шилжилт гэнэ. МТ-н импеданс тензорт үзүүлэх энэ төрлийн гальваник дисторшны нөлөөг засварлах нэг дөхөлт нь фаз тензор Φ юм. Фаз тензор нь комплекс импеданс тензорын бодит (X) ба хуурмаг (Y) хэсгүүдээр тодорхойлогдоно (5).

$$\Phi(r, \omega, \rho) = X'Y = \begin{bmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Энд X' -нь X -н урвуу тул зарим алгебрийн үйлдлүүдийн тусламжтайгаар Φ -нь 2 дугаар рангийн бодит матриц болох нь нотлогддог.

2.2. Геоцахилгаан страйк чиглэл ба хэмжээс

Онолын хувьд хоёрдугаар эрэмбийн тензор нь чиглэл ба гурван скаляр координат инвариант хэмжигдэхүүнүүдийг агуулна. Фаз тензорын хувьд координатын инвариантууд нь тензорын хамгийн их Φ_{max} , хамгийн бага Φ_{min} утгууд, хазайлтын өнцөг β ,

$$\beta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\Phi_{xy} - \Phi_{yx}}{\Phi_{xx} + \Phi_{yy}} \right) \quad (6)$$

бөгөөд хазайлтын өнцөг нь тензорын тэгш хэмийг хэмжинэ (Caldwell et al., 2004). Эллипс координат системд дээрх хэмжигдэхүүнүүдэд тулгуурлан фаз тензор нь (7) хэлбэрээр бичигдэж болохыг (Booker, 2014) авч үзсэнээр

$$\Phi = R^{-1}(\theta) \Phi_{el} = R^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} \Phi_{max} & 0 \\ 0 & \Phi_{min} \end{bmatrix} R(\beta) R(\theta) \quad (7)$$

Энд Φ_{el} эллипсийн тэнхлэгүүдэд тохируулсан фаз тензор, β хазайлтын өнцөг, $\theta = \alpha - \beta$ геоцахилгаан страйк өнцөг, α нь

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\Phi_{xy} + \Phi_{yx}}{\Phi_{xx} - \Phi_{yy}} \right) \quad (8)$$

Харин R нь эргэлтийн матрицууд байна.

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Энд θ нь 2-D орчны геоцахилгаан страйк чиглэлийг илэрхийлэх боловч (Bibby et al., 2005) энэ нь 3-D респонсийн хувьд чиглэлийн мэдээллийг илүү өгөх боломжтой гэж үзсэн байдаг. Үүнийг яагаад вэ гэдгийг төдийлөн нарийн тайлбарлаагүй боловч тоон загварчлалаар нотлогдсон байдаг. Гэхдээ энд авч үзсэн θ нь зөвхөн Z -н дисторшноос үл хамааран чиглэлийн мэдээллийг агуулна.

Харин $\tan(\beta)$ нь мөрийнхөө утгаар нормчлогдсон матриц байх тул үүнийг нормчлогдсон хазайлтын өнцөг гэж нэрлэх нь математикийн хувьд зөв байна. Хэрэв импеданс тензорын хажуугийн диагоналийн элементүүд нь хэмжилтийн x ба y тэнхлэгүүд нь геоцахилгаан страйк чиглэлд параллель ба перпендикуляр буусан бол түүний фаз тензор нь

$$\Phi_{2D} = \begin{bmatrix} \tan(\phi_{yx}) & 0 \\ 0 & \tan(\phi_{xy}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Импедансийн фазын ϕ_{xy}, ϕ_{yx} элементүүдээр илэрхийлэгдэнэ. Энэ нь 2-D нөхцөлд $\beta = 0$ болохыг илтгэх ба θ нь координатын тэнхлэгт перпендикуляр (страйк) байна. Харин $\beta \neq 0$ бол структур нь 3-D эсвэл азимутаас хамаарсан анизотроп өөрчлөлт байгааг илтгэх нь баталгаатай нөхцөл болно.

2.3. Фаз тензорын график ба программчлал

МТ – н фаз тензорыг тодорхойлох хялбар алгоритмыг зураг 1-т үзүүлсэн. Эндээс авч үзэхэд, МТ хэмжилтийн n цэг бүрд N_p үе дээр тодорхойлогдсон импеданс тензорын утгад (5-8) ашиглан фаз тензор ба түүний инвариантуудыг тодорхойлдог. Ихэнх тохиолдолд судлаачид фаз тензор анализыг 2-D загварчлалд ашиглах бөгөөд хэмжилтийн цэг бүрд тодорхойлогдсон страйк өнцгүүдийн θ туйлын диаграмм байдлаар дүрсэлж давамгайлах чиглэлийг тухайн судалгааны талбайн хувьд страйк чиглэлийг θ үнэлж,

Алгоритм:

```

n – хэмжилтийн цэгийн тоо
for i = 1 : n
  IT (i) = Импеданс тензор дуудах
  Nr (i) = үеийн тоо
  for id = 1 : IT(i)
     $\Phi$  = Тэгшитгэл 5
     $\beta$  = Тэгшитгэл 6
     $\alpha$  = Тэгшитгэл 8
     $\theta = \alpha - \beta$  Страйк чиглэл олох
  end
  if  $\theta \sim 0$ : 2-D; elseif  $\theta < 0$ : 1-D; else: 3-D end
  Rose график
  Эллипс
  Вектор
end

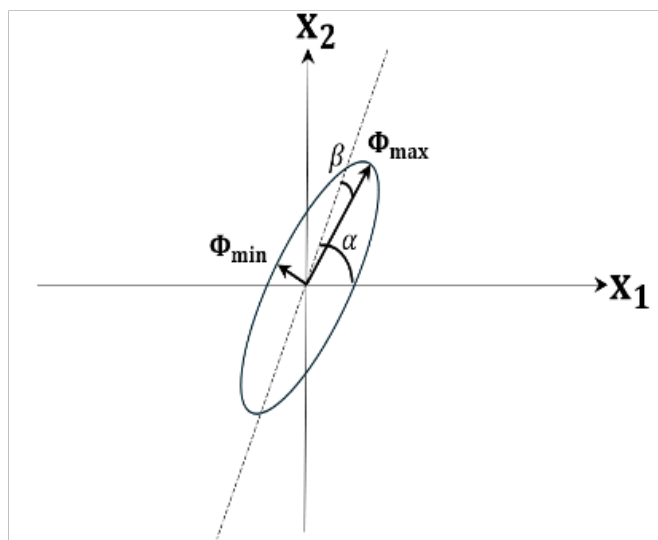
```

Зураг 1. N хэмжилтийн цэг дээр Nr үе дээр хэмжигдсэн импеданс тензорт хийх алгоритмыг үзүүлэв.

ажигласан импеданс тензорыг θ -аар эргүүлж эргүүлж 3-D биетийн засвар хийдэг. Харин фаз тензорыг геологийн тогтцын тайлалд ашиглахын тулд бид фаз тензорын эллипсийг хэмжилтийн цэг бүрд зураглан бодит топографик дээр байрлуулан геологийн биетүүдтэй харьцуулж үзэх нь нэн чухал юм.

Хоёрдугаар эрэмбийн тэгш хэмт бус тензорын инвариантуудын дүрсэлж харуулах асуудлын талаар анх [(Bibby et al., 2005)] 2005 онд геофизикийн биполе-диполе аргаар тодорхойлогдох төлөөллийн эсэргүүцлийн тензорт үзүүлсэн байдаг. Фаз тензорын хувьд мөн түүний ажлыг мөрдсөн. Энэ нь эллипсийн их ба бага тэнхлэг нь үндсэн тэнхлэгүүдээс фаз тензороос тодорхойлогдох страйк θ өнцгөөр хазайсан байдлаар дүрслэгддэг. Иймд θ нь тэгш өнцөгт координатын системд авч үзэж буй эллипсийн их тэнхлэгийн чиглэлийг илэрхийлдэг. Эллипсийг θ утгыг мэдсэнээр бага Φ_{min} ба их Φ_{max} тензорын эллипсийг дүрслэх жишээг [6]-н танилцуулснаар зураг 2-т үзүүлэв.

Практикт страйк чиглэл нь тухайн хэмжилтийн цэгт орчныг бүрдүүлж буй материалуудаас цахилгаан дамжуулах чадвар өндөртэй структурт чиглэсэн байдаг. Жишээлбэл гол болон



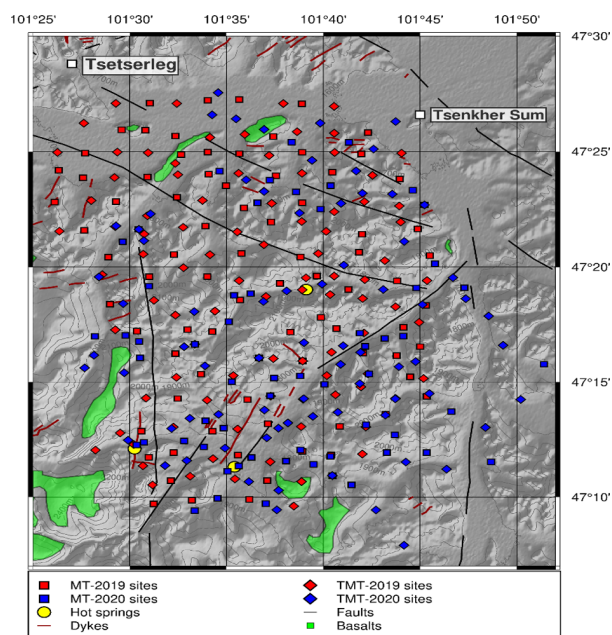
Зураг 2. Фаз тензорын график (Caldwell et al., 2004)-с сэргээв. Эллипсийн тэнхлэгийн уртууд нь тензорын үндсэн тэнхлэгүүд байх бөгөөд энэ нь тензорын сингуляр утгуудад пропорциональ байна. Энд тензор нь тэгш хэмт биш бол гуравдагч инвариант болох β -г авч үзнэ

нуурын хөндийн хувьд газрын дээд давхаргыг (~ 0 -2км, 0.001-1с үетэй долгионы интервалд тодорхойлогддог) бүрдүүлж буй хурдас чулуулаг нь нүх сүвэрхэг ба шингэнээр дүүрсэн төлөвтэй байх тул дамжуулах чадвар өндөртэй байдаг. Харин гүний тогтцын хувьд гүний хагарлын хавтгай болон эртний магматизмын ул мөр зэрэг бага эсэргүүцэлтэй тогтцууд руу ихэвчлэн чиглэдэг. МТ-н 2-D загварчлалд страйк өнцөгт тохируулан импеданс тензорыг эргүүлдэг.

Цаашлаад $\beta = 0$ бол фаз тензор нь тэгш хэмт байх ба их тэнхлэгийн чиглэл нь α -аар тодорхойлогдоно. Харин 3-D тохиолдолд, β -н тэгээс ялгаатай ба тэгш хэмт тензороос шилжсэн эргэлтийн өнцгийг илэрхийлнэ. Практикт, β -н утгаар эллипсийг өнгөөр ялган дүрсэлдэг. Энэ нь тухайн судалгааны талбайг бүрдүүлж буй геологийн биетийн нэгэн төрлийн эсвэл нэгэн төрлийн бус байдал буюу хэмжээсний тухай мэдээллийг олгодог.

3. Үр дүнгүүд

Өмнө авч үзсэн фаз тензор анализийн үр дүнг



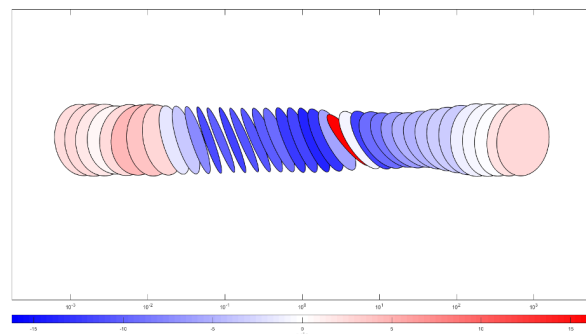
Зураг 3. Цэнхэрийн талбайд хийсэн МТ хэмжилтийн цэгүүд ба зарим чухал геологийн биетүүд.

Архангай аймгийн Цэнхэр ба Булган аймгийн Могод сумын нутагт хийсэн МТ хэмжилтийн өгөгдөлд ашиглан гарган авсан үр дүнг энэ хэсэгт оруулсан.

3.1. Цэнхэр геотермаль судалгааны талбай

Архангай аймгийн Цэнхэр сумын нутагт орших Цэнхэр, Гялгар, Борталын халуун рашаануудын илэрлүүдийг хамарсан 30×40^2 талбайд МТ судалгааны ажлыг 2019 ба 2020 оны хугацаанд хийж гүйцэтгэсэн. Хээрийн судалгааны ажлын үр дүнд нийт 208 цэгээс МТ орны өгөгдлийг өндөр чанартай бүртгэж авсан байна. Цэнхэрийн судалгааны талбайд хийсэн МТ хэмжилтийн цэгүүдийн тархалтыг Зураг. 3-т үзүүлсэн. Энд улаан ба цэнхэр өнгүүдээр 2019 ба 2020 онд хийсэн хэмжилтийн цэгүүдийг ялгасан бол дөрвөлжин ба ромбо дүрсээр бүрэн ба теллурик-МТ хэмжилтийн цэгүүдийг ялган харуулсан (жич: теллурик-МТ аргын талаар (Enkhzul & Batmagnai, 2021) -д дэлгэрэнгүй авч үзсэн). Мөн тухайн талбай дахь геологийн хагарал, интрузив дайкууд ба вулканик базальтуудыг үзүүлсэн байна.

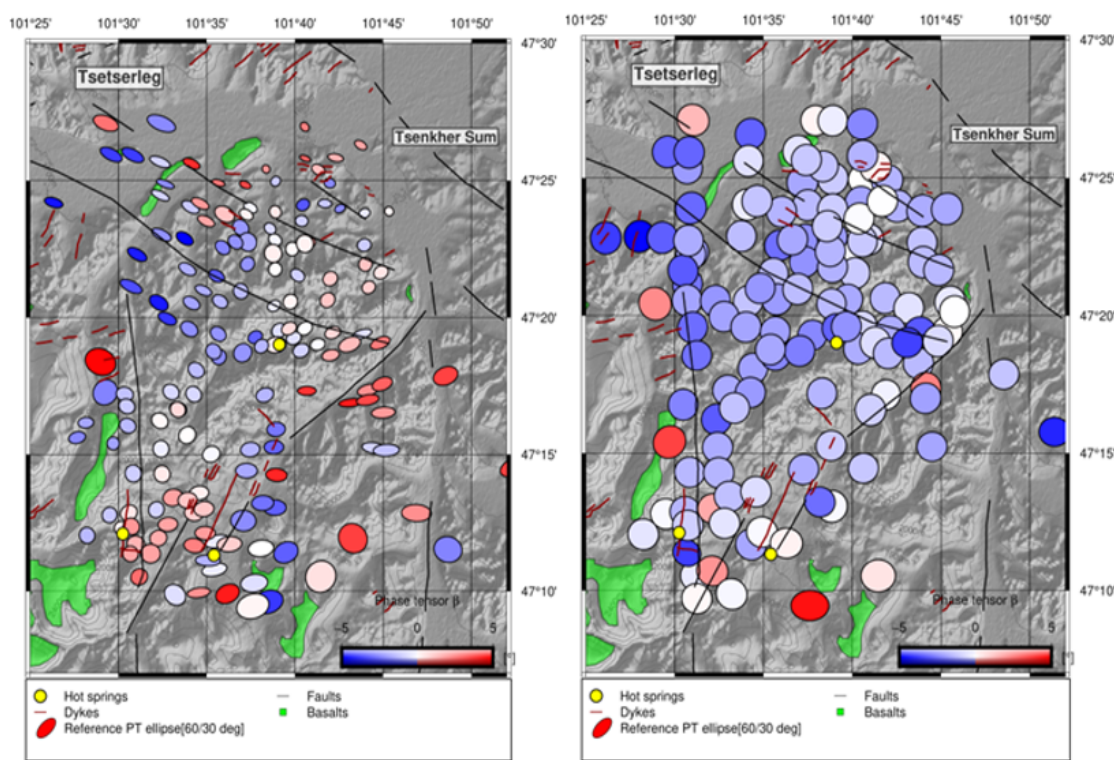
Энэ ажлын хүрээнд эдгээр цэгүүдэд бүртгэгдсэн импеданс тензорын утгаас фаз тензорын



Зураг 4. GTT2B цэгт тодорхойлсон фаз тензорын утгын эллипс.

Зураг. 1-т үзүүлсэн алгоритмын дагуу үнэлсэн. Хэмжилтийн цэг бүрд үнэлсэн фаз тензор нь бүртгэгдсэн долгионы үе бүрд өөр өөр утгатай тодорхойлогддог. Цэнхэр судалгааны талбайд 2018 онд хэмжигдсэн GTT2B дугаарт цэгийн фаз тензорын эллипсийг Зураг. 4-т үзүүлсэн (Batmagnai et al., 2019). Энд хэвтээ тэнхлэг нь үе (сек) -ийг илэрхийлж буй бөгөөд эллипсийн хазайлт нь 90° -с буюу газарзүйн зүүн зүгээс хазайх өнцгийг илэрхийлнэ. Харин $\Psi = \beta$ -г цэнхрээс улаан өнгөөр ялган үзүүлснээр хэмжилтийн цэгийн хувьд 0.001-0.02с (тухайн бүс нутагт нь бага цахилгаан дамжуулах чадвар бүхий Хангайн бүрдлээс тогтох тул нэвтрэх гүн нь тухайн 50Гц хувьд 2км хүрсэн байдаг нь өмнөх судалгаагаар тогтоогдсон (Käufel et al., 2020)) үетэй сигнал харгалзах бага гүний хувьд $\Psi > 0^\circ$ тул орчин нь 3-D байна. Түүнээс доош $0 < \Psi < -5^\circ$ байх тул нэгэн төрлийн Хангайн блокийг дүрсэлж байна гэж ойлгож болно. Цаашлаад фаз тензорын утга 100-1000с үед ихсэж буй нь дээд мантийн жигд бус тархалттай биетүүдтэй холбоотой байж болно.

Харин 3-D хэмжилтийн цэгүүдийн фаз тензорын тодорхой давтамж (үе) дээрх утга бүрийг өнгөөр ялган зураглах нь тохиромжтой байдаг. Цэнхэрийн талбайд хийсэн МТ хэмжилтийн цэгүүдийн фаз тензорын муруйг 0.1с (зүүн) ба 100с (баруун) хувьд Зураг. 5-т үзүүлсэн. Энд бага хазайлтын утга $|\beta| < 5^\circ$ нь 1-D ба 2-D үе давхаргуудын структурыг үзүүлнэ. Гэсэн хэдий ч энд ажиглагдсан β утгууд нь ерөнхийдөө өндөр байгаа нь орчин 3-D тогтоцтой болохыг илтгэнэ. Богино үед ($T = 0.1$) фаз тензорын



Зураг 5. Цэнхэрийн талбайд хийсэн МТ хэмжилтийн цэг бүрийн фаз тензорын 0.1с (зүүн), 10с (баруун) үе дээрх утгууд.

хувьд страйк чиглэл нь голын хөндий эсвэл локал хагарал руу чиглэсэн байгаа нь Зураг. 5 (зүүн) -т үзүүлснээр тодорхой байна. Харин урт үе дээрх фаз тензорын хувьд ихэвчлэн $\Phi_{max} \sim \Phi_{min}$ байх тул геоцахилгаан чиглэл нь тодорхой бус байна.

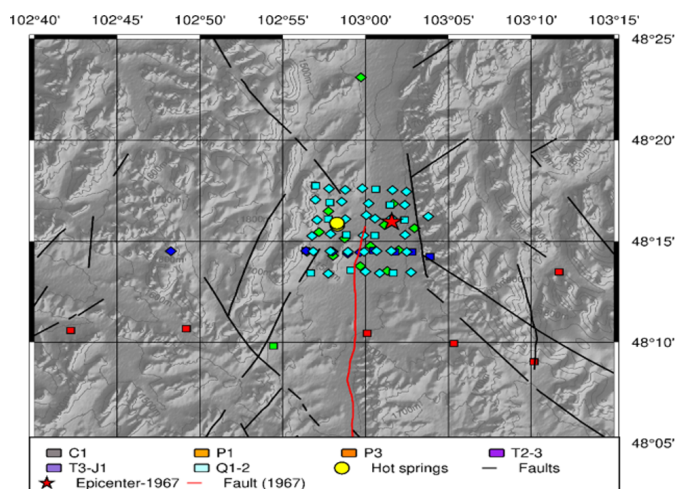
3.2. Могод судалгааны талбай

Булган аймгийн Могод сумын нутаг дахь Хульж халуун рашаан ба идэвхтэй хагарлын гүний гарал үүслийг ойлгох зорилгоор бид 2020 оноос 2024 оны хугацаанд МТ хээрийн судалгааны ажлыг хийсэн. Монгол оронд олон улсын хамтарсан төслүүд 2016 оноос хэрэгжсэн бөгөөд Цэнхэрийн судалгааны ажил ч мөн олон улсын төслийн хүрээнд хийгдсэн бол Могодын судалгааны ажлын онцлог нь манай орны судлаачид МТ хэмжилт боловсруулалтыг бие даан хэрэгжүүлж буй анхны төсөл юм. Цаашлаад Могод сумын төвтэй судалгааны талбай нь ойрхон байрлах тул хэмжилтийн өгөгдлийн хувьд цахилгаан соронзон болон соёлын шум нөлөөлөлд ихээр

автаж байсан тул ахисан түвшний хэмжилтийн загварчлал ба мэдээлэл боловсруулалт арга зүйг боловсруулах шаардлагатай тулгарсан. Иймээс 2020-2021 онуудад бид Могод талбайд туршилтын МТ хэмжилт хийж, бүртгэн авсан өгөгдөлд дүн шинжилгээ хийж талбайн цахилгаан эсэргүүцлийн зураглалыг 1-D инверсээр тодорхойлсон (Enkhzul & Batmagnai, 2021; Enkhzul et al., 2022). Улмаар 2022 онд урт үетэй 2-D шугамын хэмжилт (Enkhzul et al., 2023) ба Могод орчмын 3-D торлол бүхий хэмжилтүүдийг 2024 онд хийсэн (Enkhzul & Batmagnai, 2024).

Могодын судалгааны талбайд хийсэн МТ хэмжилтийн цэгүүдийн тархалтыг Зураг. 6-т үзүүлсэн. Энд он оны хэмжилтийг өөр өнгөөр ялгасан бөгөөд идэвхтэй ба геологийн хагарлууд мөн Хульж халуун рашааны байрлалыг үзүүлэв.

Могод судалгааны талбайд 2024 ба 2020 онд хэмжигдсэн 6 (хойноос урагш) шугамын дагуу фаз тензорын эллипсийг Зураг. 7-т үзүүлсэн, энд хэвтээ тэнхлэг нь үе, хэмжилтийн цэгүүд ба босоо тэнхлэгийн дагуу долгионы үеийг илэр-



Зураг 6. Могодын талбайд хийсэн MT хэмжилтийн цэгүүд ба орчны геологийн ба идэвхтэй хагаралын мөрүүд.

хийлж буй бөгөөд эллипсийн хазайлт нь 90° -с буюу газарзүйн зүүн зүгээс хазайж буй өнцгийг мөн илэрхийлнэ. Фаз тензорын эллипс нь ерөнхийдөө шугам бүрийн дагуу буюу эх тэнхлэгийн дагуу сунаж чиглэн тогтсон нь талбайн баруун талд орших Орхоны хөндийгөөр урсах гүйдлийн урсгалтай холбоотой байж болно. Мөн Ψ утга өөр байгаа нь судалгааны талбайн доорх гүний үе давхаргын тогтоц нь комплекс 3-D болохыг илэрхийлнэ.

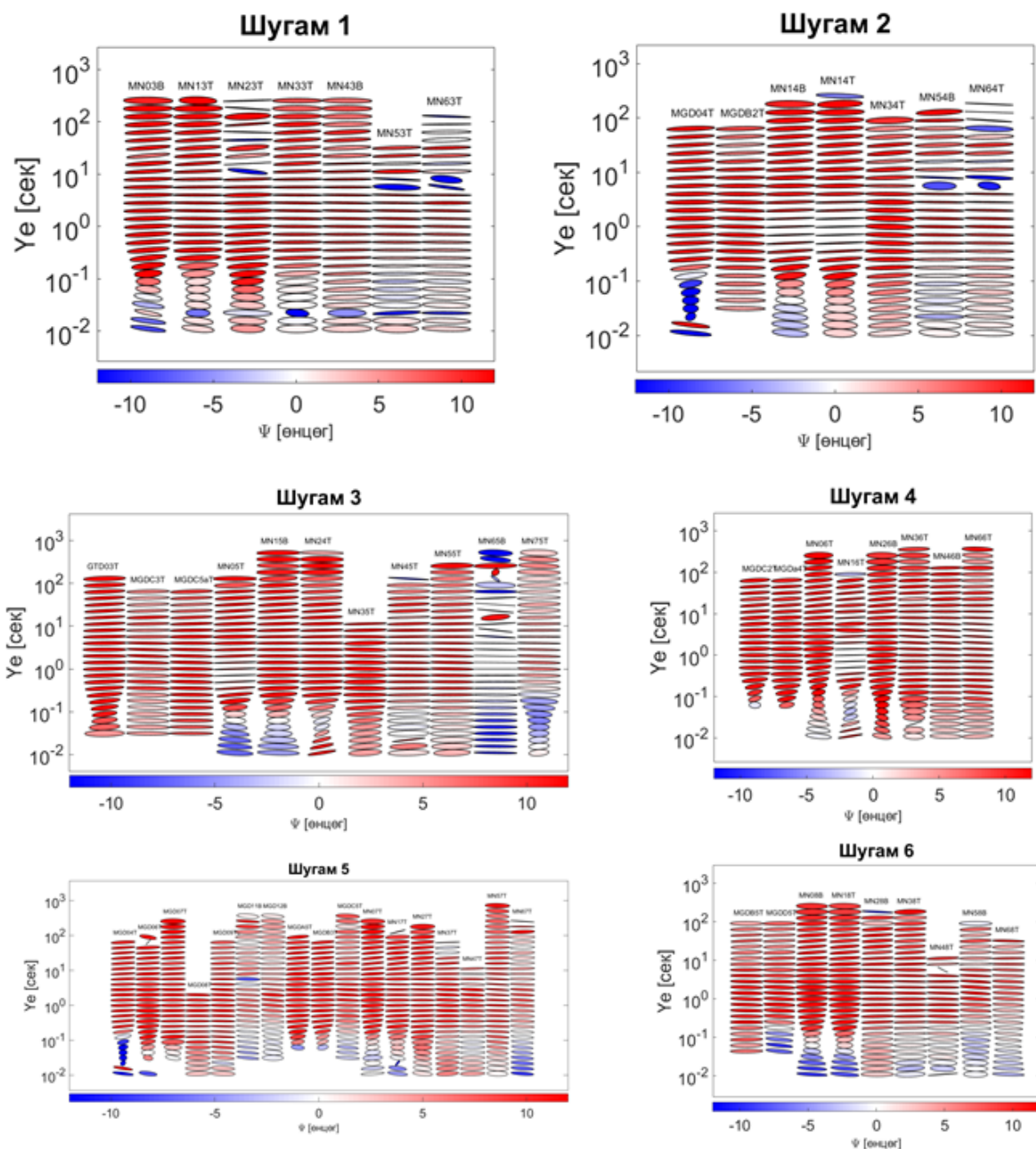
Цаашлаад Зураг. 8-т $T=0.01$ с зүүн ба $T=45$ с (баруун) үеүд дээр тодорхойлогдсон фаз тензорын эллипсийг үзүүлсэн. Могод талбайн хувьд фаз тензорын эллипс нь өндөр давтамж буюу богино үе дээр талбайн төв хэсгээр хэмжигдсэн хэмжилтийн цэгүүд дээр тэгээс их ба их тэнхлэг нь хөндийн дагуу чиглэсэн байна. Харин талбайн баруун талаар үзүүлсэн фаз тензорын утга $|\beta| > 0^\circ$ бага байгаа нь нэгэн төрлийн Могод формацтай холбоотойгоор тайлбарлагдаж болно. Өмнө тайлбарласнаар өндөр давтамжийн буюу $T = 0.01$ фаз тензорын утга нь бага гүний 200м хүртэлх зузаантай үе давхаргын мэдээллийг агуулж байгаа. Иймээс Могодын хөндийд ажиглагдаж буй $|\beta| < 0^\circ$ нь гол ба хур тунадасны усаар ханасан эсвэл хэсэгчилэн ханасан хурдасны нэгэн төрлийн тархалтаар тайлбарлагдаж болно. Харин талбайн баруун ба зүүн хэсэг нь геоморфологийн хувьд

хоёул өндөрлөг уулсын бэлээр хэмжигдсэн хэмжилтийн цэгүүд боловч тэдний үзүүлэх $|\beta|$ нь харилцан адилгүй өөрөөр хэлбэл баруун тал нь бага гүний хувьд харьцангуй 1-D буюу цул биет бол зүүн тал нь комплекс тогтоцтой байна. Энэ нь Могодын буюу хойноос урагш чиглэсэн хагаралтай холбогдон тайлбарлагдаж болно. Учир нь хагарлын бүс нь ус урсгах орон зай байх бөгөөд усны нөлөөгөөр бий болох ионт гүйдэл нь MT -н өгөгдөлд страйк чиглэлээр хянагддаг. Фаз тензорын утгууд Зураг. 8 (баруун)-т үзүүлснээр хагаралд ойртох тусам түүн рүү хүчтэй хазайсан байгаа нь үүний нэгэн нотолгоо болно.

Урт үетэй буюу $T=45$ с ($\sim 5 - 15$) -ийн хувьд фаз тензорын эллипслэг байдал бага буюу голлох страйк чиглэл ажиглагдахгүй боловч ерөнхийдөө талбайн зүүн талд орших Могодын хагарал руу чиглэсэн хандлагатай байна. Харин $|\beta| > 0^\circ$ байгаа нь Хангайн ерөнхий геоцахилгаан тогтцоос өөр байгаа нь ихээхэн сонирхолтой үр дүн юм. Магадгүй энэ үр дүн нь Могод орчмын бүс нутаг нь хоёр өөр тектоникийн хил зааг эсвэл гүний хагарлын шинжтэй структур байж болохыг илтгэж байна.

4. Хэлэлцүүлэг

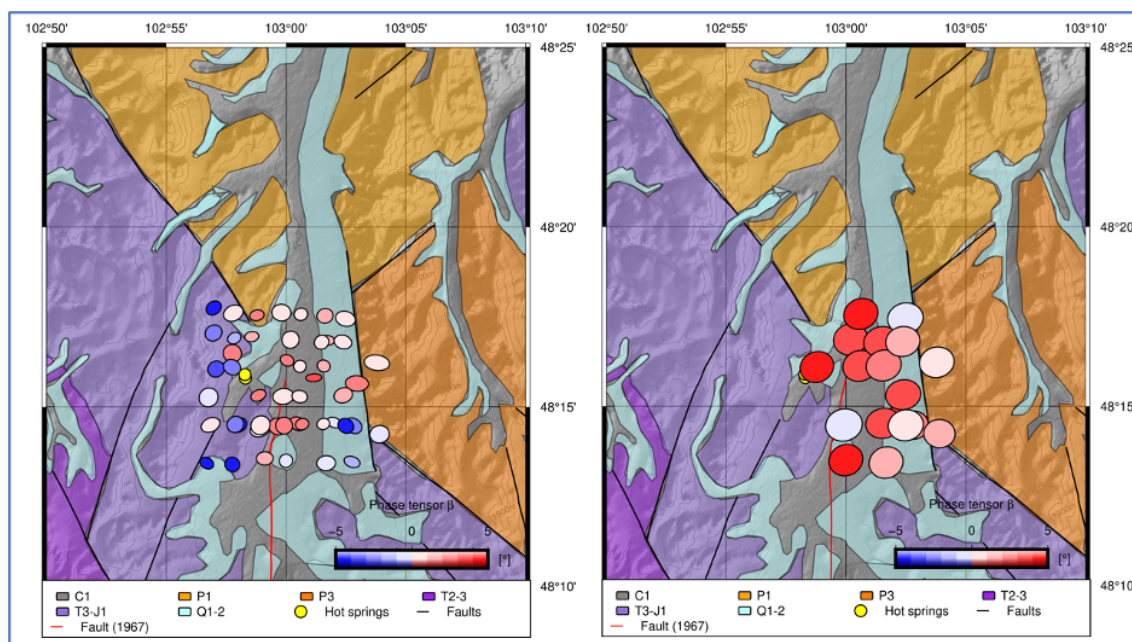
Хоёрдугаар хэсэгт авч үзсэнээр, үе давхаргуудын гео-цахилгаан страйк чиглэл θ нь страйк өнцгийн анализаар тодорхойлогдсон [(Caldwell et al., 2004)(Booker, 2014)]. Цэнхэрийн талбайн бүх хэмжилтийн цэгүүдийн гео-цахилгаан страйк чиглэлийн туйлын диаграммыг 0.1-1с ба 1-10с хувьд тус тус Зураг. 9-т үзүүлсэн. Эдгээр үеүдэд давамгайлж буй гео-цахилгаан страйк чиглэл нь хойд зүгээс цагийн зүүний дагуу 62.9° болох нь тодорхой байна. Гео-цахилгаан страйк нь талбайг хүрээлэн буй орчноор урсах цахилгаан гүйдлийн чиглэлийг илтгэх тул богино үет фаз тензорын хувьд геологийн хагарал, ан цавын байрлал, шингэнээр дүүрсэн хурдас бүхий локал хөндийн чиглэлийг илтгэж байна (Зураг. 3 үз). Урт үетэй ($T = 10 - 1000$) гео-цахилгаан чиглэлийг Зураг. 10-т үзүүлсэн, энд гео-цахилгаан страйк чиглэл нь $T = 10 - 100$ хувьд 23.8° байна. Энэ нь судал-



Зураг 7. Могодын талбайд хийсэн МТ хэмжилтийн 6 шугамын дагуух фаз тензорын эллипсүүд.

гааны талбайн зүүн хойд 23.8° ба баруун урд $23.8^\circ + 180^\circ = 203.8^\circ$ эсгийг илэрхийлэх бөгөөд вулканик базальт, интрузив дайк болон Гялгар халуун рашааны эргэн тойрны хагарлуудад чиглэсэн байна. Тухайн страйк чиглэл нь гадарга дээр ажиглагдах геологийн биетүүдийн гүний гарал үүслийг илэрхийлэх бөгөөд эдгээр биетүүд нь талбайн хувьд уг страйк чиглэлийн

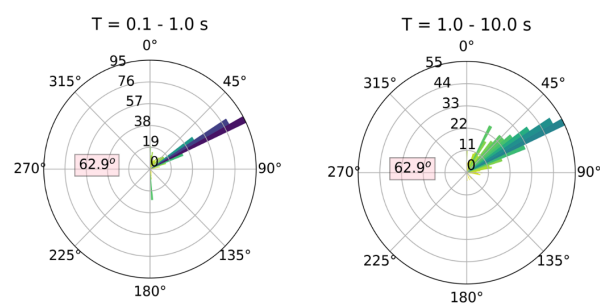
дагуу тогтсон байж болно. Гео-цахилгаан страйк чиглэл нь $T = 100 - 1000$ хувьд 104.9° гэж Зураг. 10(баруун)-т тодорхойлсон байна. Энд туйлын диаграммын 90° -н хоёрдмол утгыг авч үзвэл $104.9^\circ - 90^\circ \approx 15^\circ$ буюу [(Käufel et al., 2020)] тодорхойлсон региональ страйк чиглэлийн утгатай нийцэж байна. Мөн уг страйк чиглэл нь Зураг. 3-т үзүүлсэн судалгааны



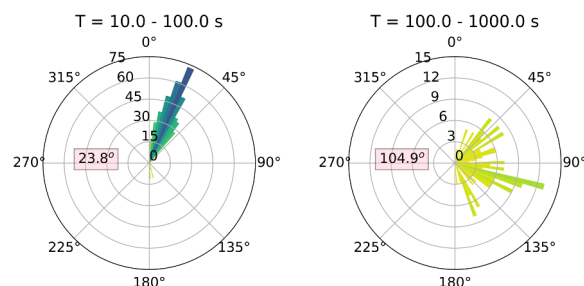
Зураг 8. Могод талбайд хийсэн МТ хэмжилтийн цэг бүрийн фаз тензорын 0.01с (зүүн), 45с (баруун) үе дээрх утгууд.

талбайн хойд хэсэгт орших геологийн хагарлын чиглэлтэй давхцаж байна. Иймээс Цэнхэр судалгааны талбайн хувьд бага гүний страйк чиглэл нь голын ба хур тунадасны усаар ханасан цахилгаан дамжуулах чадвар бүхий хагарал, ан цав руу чиглэсэн бол дээд царцдасны түвшинд талбайн хувьд ажиглагдах магматизмын гаралтай биетүүд рүү чиглэх бөгөөд түүний суналыг мөн илэрхийлж байна. Харин доод царцдас ба дээд мантийн хувьд страйк чиглэл нь Хангайн нурууны региональ хагарал ба Монгол орны шугаман тектоник тогтцын чиглэлийг илэрхийлж байна.

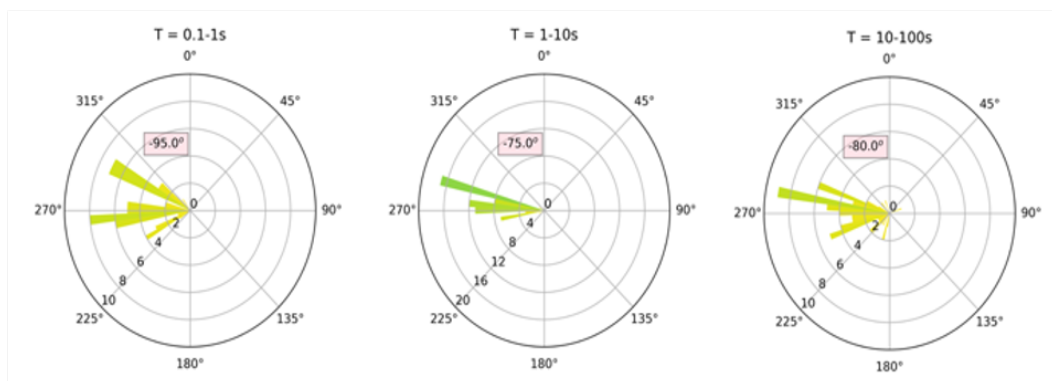
Могод талбайн страйк чиглэл нь бүх давтамжийн хувьд -95° -аас -75° буюу $5^{\circ} - 20^{\circ}$ -т чиглэсэн байна (Зураг. 11). Энэ нь тухайн талбайн хувьд давамгайлж буй страйк чиглэл буюу гүйдлийн системийн зонхилох чиглэл нь талбайн баруун ба зүүн хойд чиглэлээс ижил түвшинд үзүүлж байгааг илтгэж байна. Региональ ба локал геологийн хувьд тухайн страйк чиглэл нь Орхоны хөндий ба талбайг хүрээлсэн хагарлууд руу чиглэсэн байна. Могод талбайн хувьд бид региональ страйк чиглэлийн утгыг илүү үнэмшилтэйгээр тодорхойлохын тулд нэмэлт том



Зураг 9. θ -ийн $T=0.1-1$ с ба $T=1-10$ с дээр тодорхойлогдсон гео-цахилгаан страйк чиглэлийн туйлын диаграмм.



Зураг 10. θ -ийн $T=10-100$ с ба $T=100-1000$ с дээр тодорхойлогдсон гео-цахилгаан страйк чиглэлийн туйлын диаграмм.



Зураг 11. θ -ийн $T=0.1-1$ с ба $T=10-100$ с дээр тодорхойлогдсон гео-цахилгаан страйк чиглэлийн туйлын диаграмм.

масштабын хэмжилтийн ажлуудыг хийх шаардлагатай гэж үзэж байна. Хэдийгээр страйк чиглэлийн утга нь региональ структуруудтай тохирч байгаа хэдий ч локаль шинж чанарыг ойлгоход мэдээллийн сан хангалтгүй байна.

5. Дүгнэлт

Энэ судалгааны ажилд МТ фаз тензорын математик болон физик агуулгыг танилцуулан улмаар Архангай аймгийн Цэнхэр, Булган аймгийн Могод сумын нутагт хийсэн МТ хэмжилтийн цэгийн өгөгдлүүдэд ашиглан анализ хийв. Цэнхэр судалгааны талбайн хувьд олж авсан хэмжилтийн цэгийн өгөгдлүүд нь талбайн мэдээллийг бүрэн өгч чадахуйц шаардлага хангасан байсан бол Могод судалгааны талбайн хувьд локаль шинж чанарыг ойлгохын тулд МТ хэмжилтийг илүү өргөн хүрээний талбайг хамарсан байдлаар хийх шаардлагатай гэж үзэж байна.

Цэнхэрийн судалгааны талбайн хувьд гео-цахилгаан страйк чиглэлийн туйлын диаграммыг богино үед 0.1-1с ба 1-10с, урт үед 10-100с ба 100-1000с гэж тус тус тодорхойлсон нь тухайн геологийн талбайн хагарал, ан цав, магматизмын гаралтай биетүүд, региональ хагарал зэрэгтэй давхцаж байна. Харин Могодын хувьд гео-цахилгаан страйк чиглэл нь бүх давтамжийн хувьд -95° -аас -75° буюу $5^\circ - 20^\circ$ т чиглэсэн байгаа нь Орхоны хөндий ба талбайг хүрээлсэн хагарлууд руу чиглэсэн байна. Энэ төрлийн судалгааны ажил нь Монголд анхдагч болж байгаа учраас цаашид талбайн тухай мэдээллийг илүү нарийвчлалтай олж авахын тулд хээрийн судалгааны ажлыг өргөжүүлж мөн бусад

геофизикийн судалгааны ажлуудтай харьцуулна.

Талархал

МТ өгөгдлийг судалгааны талбайгаас бүртгэн авах бүхий л хээрийн ажлын үйл ажиллагааг зохион байгуулсан соронзон судлалын салбарын эрдэм шинжилгээний ажилтан Ш.Цэрэндүг, Х.Цагаансүх, Г.Баянжаргал нарт гүнээ талархал илэрхийлье. Судалгааны ажилд ашигласан МАТЛАБ кодыг https://gitlab.com/bmagnai0319/pt_analysis холбоосоос татаж авах боломжтой ба зөвшөөрлийг судлаачидтай холбогдон авна уу.

Ашигласан номзүй

- Batmagnai, E. & Sukhbaatar, U., 2016. Цахилгаан соронзон тандлын сигнал боловсруулалт арга, *Khurel-togoot*.
- Batmagnai, E. & Sukhbaatar, U., 2017. Mag-mtt соронзон оргил дахь Леми-418 магнетотеллурикийн станцын мэдээлэл боловсруулалт (1. Хугацааны цуваанаас импеданс тензорыг тодорхойлох), *Geophysics and Astromony*, **4**, 84–91.
- Batmagnai, E., Tsegmed, B., Nasan-Ochir, T., Gantsogt, S., & Eldew-Ochir, B., 2019. A pilot geomagnetic and magnetotelluric survey in mogod area of the eastern hangai, mongolia, *Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences*, pp. 71–81.
- Berdichevsky, M. N. & Dmitriev, V. I., 2008. *Models and methods of magnetotellurics*, Springer Science & Business Media.
- Bibby, H., Caldwell, T., & Brown, C., 2005. Determinable and non-determinable parameters of galvanic distortion in magnetotellurics, *Geophysical Journal International*, **163**(3), 915–930.

- Booker, J. R., 2014. The magnetotelluric phase tensor: a critical review, *Surveys in Geophysics*, **35**, 7–40.
- Caldwell, T. G., Bibby, H. M., & Brown, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor, *Geophysical Journal International*, **158**(2), 457–469.
- Comeau, M., Becken, M., Käufel, J., Kuvshinov, A., Group, H. W., et al., 2018. The electrical resistivity structure of central mongolia observed with magnetotelluric data, in *27. Schmucker-Weidelt-Kolloquium für Elektromagnetische Tiefenforschung*, pp. 2–8, Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e. V.
- Egbert, G. D. & Booker, J. R., 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions, *Geophysical Journal International*, **87**(1), 173–194.
- Enkhzul, B. & Batmagnai, E., 2021. Нэг хэмжээст магнетотеллурикийн орны загварчлалыг детерминистик инверсийн аргаар тодорхойлох, *Geophysics and Astornomy*, (8), 94–106.
- Enkhzul, B. & Batmagnai, E., 2024. Deep-root of geothermal system and active fault imaged by magnetotelluric surveys under the mogod area, mongolian eastern hangai, *Хүрэлтогоом-2024 эрдэм шинжилгээний хурлын эмхэтгэл*, pp. 81–90.
- Enkhzul, B., Batmagnai, E., Tserendug, S., & Bayanjargal, G., 2022. Investigation of the electrical resistivity structure of the subsurface at mogod valley in central mongolia: Insight is using 1d magnetotelluric inversion, *Mongolian Geoscientist*, **27**(54), 20–33.
- Enkhzul, B., Batmagnai, E., & Tserendug, S., 2023. Могодын талбайд хийгдэж буй магнетотеллурикийн судалгааны ажлын сүүлийн үр дүнгүүд ба хэтийн төлөвлөгөө, *Геологи*, (39), 30–41.
- Groom, R. W. & Bahr, K., 1992. Corrections for near surface effects: decomposition of the magnetotelluric impedance tensor and scaling corrections for regional resistivities: a tutorial, *Surveys in Geophysics*, **13**(4), 341–379.
- Käufel, J. S., Grayver, A. V., Comeau, M. J., Kuvshinov, A. V., Becken, M., Kamm, J., Batmagnai, E., & Demberel, S., 2020. Magnetotelluric multiscale 3-d inversion reveals crustal and upper mantle structure beneath the hangai and gobi-altai region in mongolia, *Geophysical Journal International*, **221**(2), 1002–1028.
- Kelbert, A., Balch, C. C., Pulkkinen, A., Egbert, G. D., Love, J. J., Rigler, E. J., & Fujii, I., 2017. Methodology for time-domain estimation of storm time geoelectric fields using the 3-d magnetotelluric response tensors, *Space Weather*, **15**(7), 874–894.
- Simpson, F. & Bahr, K., 2005. *Practical magnetotellurics*, Cambridge University Press.
- Singer, B. S., 1992. Correction for distortions of magnetotelluric fields: limits of validity of the static approach, *Surveys in Geophysics*, **13**, 309–340.
- Utada, H. & Munekane, H., 2000. On galvanic distortion of regional 3-d mt impedances on galvanic distortion of regional three-dimensional magnetotelluric impedances, *Geophysical Journal International*, **140**(2), 385–398.