

Geo-electrical structure and dimensionality analysis: Case study at the Mogod region

Enkhzul Bayartogtokh^{1*}, Batmagnai Erdenechimeg¹, Tserendug Shoovdor¹, and Nasan-Ochir Tumen¹

¹Institute 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.v11i1.4185>

Abstract

In the study region, which is located in Mogod soum, Bulgan Aimag, there is a number of geological and geophysical studies have been conducted due to it is interested in understanding the deep structure of the Khulij hot spring and Mogod fault. Additionally, one of the greatest earthquakes in the XX century in Mongolia occurred in this region. In this study, we report results from newly and more densely measured MT sites in the Mogod region and explain the structure together with the data from past years that have already been measured. The previous one-dimensional depth model was updated with the values of these measurements, and its properties were discussed, which improved the quality of this one-dimensional model compared to the results of our survey in 2022. We also used the SSQ impedance to avoid the effects of near-surface heterogeneities that cause certain distortions in the value of the measurement points.

Keywords: 1-D MT model, SSQ impedance, galvanic distortion

1. Удиртгал

Магнетотеллурик (МТ)-ийн аргаар дэлхийн гүний үе давхаргуудын цахилгаан дамжуулах чадварын түгэлтийн утгыг тодорхойлдог (Chave & Jones, 2012; Simpson & Bahr, 2005). Гэвч МТ-ийн анхдагч өгөгдөл нь цахилгаан соронзон орны хугацааны өөрчлөлт юм. МТ-д орнуудын хамаарлыг давтамжийн мужид илтгэх хэмжигдэхүүн бол комплекс утга бүхий импеданс тензор (ИТ) юм (Berdichevsky & Dmitriev, 2008). Хэдийгээр ИТ нь МТ тандалтын үндсэн функц боловч орчны топографикийн хэт зөрүү нэгэн төрлийн бус биетүүдийн тархалтаас хамааран ИТ-ээр тодорхойлогдох төлөөллийн эсэргүүцлийн утгад нөлөө үзүүлдэг. ИТ-д үзүүлдэг уг нөлөөг гальваник дисторшн гэнэ (Simpson & Bahr, 2005), (Swift, 1987). Гальваник дисторшныг (Comeau

et al., 2024) үүний физик шинж чанар ба тоон гүйцэтгэлийг тайлбарласан) засварлах хэд хэдэн дөхөлтүүд байдгийн нэг нь фаз тензор (ФТ) юм. Учир нь ФТ нь дисторшноос үл хамаардаг. ФТ нь мөн геоцахилгаан страйк чиглэлийн болон орчны хэмжээсийн мэдээллийг агуулж байдаг (Egbert & Booker, 1986). Энэ судалгааны ажилд Могод талбайд хийсэн МТ хэмжилтийн өгөгдлөөс тодорхойлсон 1-D гүний загвар ба түүний шинж чанарын талаар авч үзсэн.

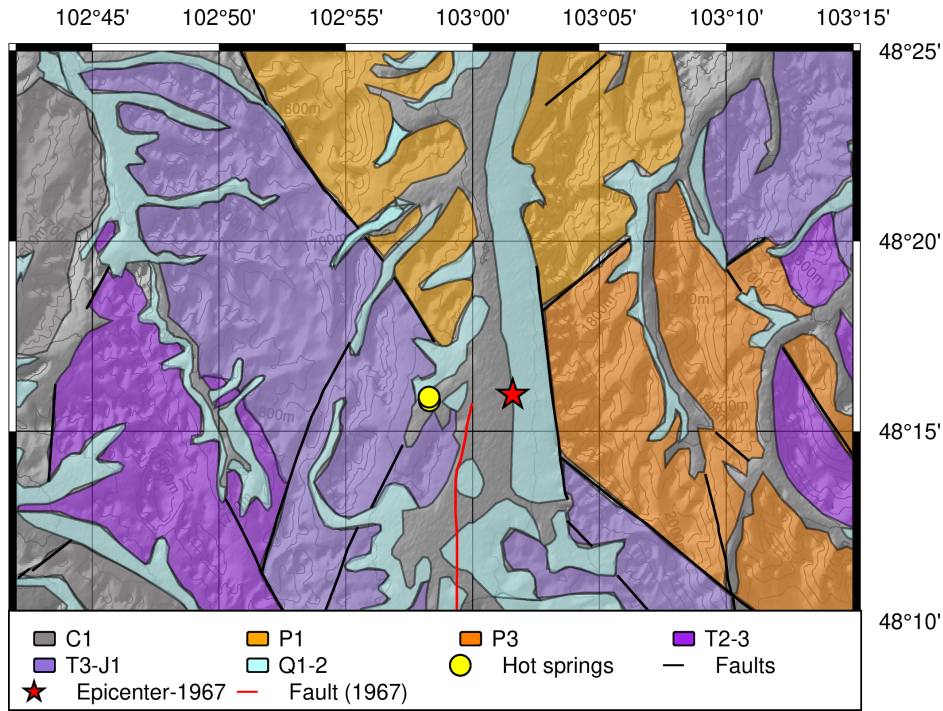
Судалгааны талбай нь Улаанбаатар хотоос ойролцоогоор 260 км, Булган аймгийн төвөөс 150 км зайд байрлалтай Булган аймгийн Могод суманд байрлах ба тектоник мужлалын хувьд Орхоны атираат мегабүс, Хульж-Ерөөгийн бүсэд хамаардаг (Buyantogtoh et al., 2022). Зураг. 1-д үзүүлсэн геологийн зураглалыг авч үзвэл, талбай нь ерөнхийдөө палеозой (карбон- хожуу

перм), мезозой (дунд террайс- юра), кайнозойн (дөрөвдөгчийн) нас бүхий өөр өөр литологийн нэгжүүдээс бүрдсэн байна. Региональ структурын хувьд тухайн бүс нутагт Хануй ба Могод формацийн дунд-вулканик чулуулгуудыг ялгасан байдаг (Tsukada et al., 2008). Tsukada et al. (2008) нарын судалснаар Могод формацийн вулканик чулуулаг нь галт уулын хайлмагийн ул мөрүүдийг агуулсан гэж дүгнэжээ. Мөн Зураг. 1 үзүүлсэн Перм-Триассын настай интрузив чулуулгууд нь доод пермийн Могод, доод-хожуу пермийн Хануй групп ба Хожуу пермийн Бугат/Баруунбүрэн формацын вулканик чулуулгуудыг агуулж буйг тогтоосон ба Могод формацын насыг 292 Ма гэж үнэлсэн байдаг (Tsukada et al., 2008).

Могод судалгааны талбайд ХХ зуунд Монголын газар нутагт болсон хүчтэй дөрвөн газар хөдлөлтийн нэг нь 1967 оны 1 сарын 5 – ны өдөр М7.5-тай газар хөдлөл тохиолдож байсан юм. Уг хөдлөл болон түүний дараах давтан хөдлөлүүд цаашлаад одоог хүртэл үргэлжилж буй газар хөдлөлтийн идэвхтэй байдал нь сейсмологийн улмаар гүний тогтцын судалгааг тухайн бүс нутагт хийх ихээхэн шаардлагатай байдалд хүргэдэг. Газар хөдлөлтийн улмаас үүссэн хагарал нь Могод сумын төвөөс 1.5 км орчмоос урагшаа чиглэлд Түлээ уулын оройгоор даван, зүүн урагш эргэн нийт 45 км урт үргэлжилнэ. Өнөөдрийн судлаачдын хуримтлуулсан мэдлэгийн хүрээнд тухайн бүсэд тохиолдсон хүчтэй газар хөдлөлт болсон шалтгааныг тухайн бүс нутаг нь Сибирь, Энэтхэг-Азийн тектоник хавтангийн заагаас сунаж тогтсон буюу эдгээр хавтангуудын мөргөлдөөнөөс үүдэлтэй түрэлтийн улмаас дефформацлагдаж байгаатай холбоотой гэж үзсэн байна. Мөн Хангайн нурууны том тектоник эвдэрлийн бүсүүдийг илтгэж буй гол мөрний хөндий хэлбэрт тулгуурласан геоморфологийн судалгааны ажил ба талбайд хийсэн геологийн судалгааны ажлын сүүлийн үеийн үр дүнгүүд нь тухайн бүс нутагт явагдаж буй газар хөдлөлтийн идэвхжилт нь Хангайн нуруу дахь томоохон хагарлуудын кинематик зүй тогтолтой хамааралтай гэж дүгнэж байна. Мөн судалгааны талбайн өөр нэгэн сонирхолтой байгалийн зүй тогтол бол Хульж халуун рашаан юм. Хуль-

жийн халуун рашаан нь газрын гадарга дээр 45°C температуртай ба Могод сумын төвийн баруун талд оршдог. Монгол орны халуун хүйтэн рашааны судалгааны ажлууд 1980-аад он ба 2000 оны эхээр геохимийн ажилд тулгуурлан хийгдсэн байдаг ба уг халуун рашааны гарал үүслийг биокарбонатик гарал үүсэлтэй магадгүй халуун чулуу мантиар халсан ус гэж үзсэн байдаг (Oyuntsetseg, 2015). Могодын талбай нь дээр дурдсан геошинжлэх сонирхолтой тогтцуудыг агуулсан байдаг нь тухайн бүс нутгийн гүний тогтоц формацийн талаар тодорхой ойлголт авах өндөр шаардлагатай болохыг илэрхийлж байна. Учир нь газар хөдлөлт, халуун рашааны илрэх зэрэг үзэгдлүүд нь ихэвчлэн гүний хагарал болон дэлхийн дотоодод явагдаж буй геодинамик процессын ул мөр байдаг. Цаашлаад судалгааны талбайн гүний тогтцын талаарх мэдлэг нь геошинжлэх ухаан тэр дундаа сейсмологи, сэргээгдэх эрчим хүчний салбарт өндөр ач холбогдолтой юм.

Могодын талбайд хүчтэй газар хөдлөлт болсон ба түүний нөлөөлөл нь Улаанбаатар хотод мэдрэгдсэн зэрэгтэй уялдан тухайн судалгааны талбайн хагарлын бүсэд 1980-аад онд геологи, геофизикийн маш олон судалгааны ажлууд хийгдсээр ирсэн. Өмнөх судлаачид Могодын хагарлын бүсэд геологи, геофизикийн өргөн хүрээний судалгаа явуулж хагарлын зураглал, морфотектоник, кинематик, шилжилт, палеосейсмологийн талаар мэдээлэл бүрдүүлсэн. Гэвч эдгээр ажлууд нь ихэвчлэн бага гүний геофизикийн судалгааны ажилд тулгуурласан байх тул гүний тогтцын хангалттай судалгааны ажил бүрэн хийгдээгүй байна. Одоогоор тухайн бүс нутгийн гүний (царцдасны хувьд) тогтцын анхдагч мэдээллийг (Zorin et al., 1990) нарын Монгол орны хувьд хийсэн геотранскет хүндийн хүчний зураглал ажил ба (Käufel et al., 2018) нарын Хангайн нурууны МТ ажлын үр дүнгүүдээс авч болох хэдий ч тухайн бүс нутаг дахь хэмжилтийн цэгийн тоо бага (бараг хэмжилт хийгдээгүй) байгаатай уялдан нарийвчлал маш бага байдаг. Харин 2019 онд (Batmagnai et al., 2019) нар Могодын хагарал орчимд туршилтын МТ хэмжилт хийж гүний 1-D загвар гаргасан ба 2022 онд (Enkhzul et al., 2022) нар талбайн



Зураг 1. Судалгааны талбай орчмын 1:200000 масштабтай геологийн хялбаршуулсан зураг.

цахилгаан дамжуулах чадварын 1-D загварыг дээд царцдасны нарийвчлалтай гаргасан байдаг.

Энэхүү судалгааны ажилд тухайн бүс нутагт 2020-2024 онуудад хийсэн МТ өгөгдлийг нэгтгэн боловсруулж 1-D гүний загварыг шинэ өгөгдөлтэй нэгтгэн шинэчилсэн хувилбарын шинж чанарын талаар авч хэлэлцэх болно.

2. Арга зүй

2.1. МТ респонс

Магнетотеллурик (МТ) тандалтын үндсэн респонс бол импеданс тензор (ИТ) юм (Tikhonov, 1950). МТ-д, дэлхийн гадарга дээр бүртгэгдэх хэвтээ цахилгаан ба соронзон орны хоорондын хамаарлыг илтгэх импеданс тензорыг Z үнэлж түүний элементүүдээс төлөөллийн эсэргүүцэл ρ болон фазыг ϕ тодорхойлдог (Egbert & Booker, 1986). Импеданс тензор нь хэмжилтийн цэгийн байрлал $r = r(x, y, z)$, давтамж ω , орчны дамжуулах чадвараас σ хамаарсан комплекс тоонуудаас бүрддэг.

$$Z(r, \omega, \sigma) = \begin{pmatrix} Z_{xx}(r, \omega, \sigma) & Z_{xy}(r, \omega, \sigma) \\ Z_{yx}(r, \omega, \sigma) & Z_{yy}(r, \omega, \sigma) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{1}{\omega \mu} |Z_{ij}| \quad (2)$$

$$\phi = \left(\frac{\text{Im}(Z_{ij})}{\text{Re}(Z_{ij})} \right) \quad (3)$$

МТ-ийн импеданс тензор нь мөн цахилгаан соронзон долгионы нэвтрэх гүний талаарх мэдээллийг агуулж байдаг ба үүнийг анх ((Weidelt, 1973) С-респонс 4-ийн бодит утга нь нэвтрэх гүнийг илэрхийлдэг болохыг нотолсон.

$$C = \sqrt{\frac{1}{i\omega\mu_0\sigma}} \quad (4)$$

2.2. ИТ-ийн загварчлал

МТ-д бид 1-D, 2-D ба 3-D орчны хувьд ИТ-ийг геофизикийн шугаман бус инверсийн алгоритмд тулгуурлан загварчилдаг. МТ инверсийн арга зүй (Cox & Zhdanov, 2008; Avdeev & Avdeeva, 2008), (Aster et al., 2018) түүний математик тавилтын талаар дэлгэрэнгүй тайлбарласан. Мөн зохиогчид (Enkhzul & Batmagnai, 2021; Enkhzul et al., 2021) нар арга зүй хөгжүүлэлт түүний синтетик ба бодит өгөгдлийн хэрэглээний талаар хэвлүүлсэн байдаг.

Энэ судалгааны ажилд бид 1-D МТ-н детерминистик инверсийн арга зүйг ашигласан (Enkhzül & Batmagnai (2021)). 1-D МТ-ийн хувьд скаляр импеданс ашигладаг бөгөөд ихэвчлэн ИТ-ийн $Z_{xy} = -Z_{yx}$ нөхцөлөөр хэрэглэдэг. Харин бид SSQ импедансийг энэ судалгаанд ашигласан. SSQ импеданс нь 5 ИТ-ийн элементүүдийн квадрат нийлбэр байх ба (Rung-Arunwan et al., 2016) авч үзсэнээр энэ нь хэмжилт хийж буй цэгийн хувьд ямар нэгэн дисторшний нөлөөг засварлаж чаддаг юм.

$$Z_{SSQ}(\mathbf{r}_i, \omega) = \sqrt{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2} \quad (5)$$

Энд $\mathbf{r}$ нь цэгийн дугаарыг илэрхийлнэ. Бидний ашигласан 1-D инверсийн код нь 6-аар өгөгдсөн оновчлолын функцийг Левенберг-Маркуардын аргад тулгуурлан минумыг олох замаар өгөгдөл хамгийн сайн тохирсон загварыг олдог.

$$\mathbb{F}(m) = \mathbb{F}_d(\mathbf{d}, \mathbf{m}) + \beta \mathbb{F}_m(\mathbf{m}) \xrightarrow{\mathbf{m}} \min \quad (6)$$

Энд $\mathbb{F}_d$ нь өгөгдлийн алдаа, $\mathbb{F}_m$ ба $\beta > 0$ нь регуляцийн нөхцөл ба регуляцийн параметрууд ба $\mathbf{d}$ нь өгөгдлийн вектор $\mathbf{m} = v(\sigma)$ загварын вектор юм.

2.3. Фаз тензор

МТ-ийн өгөгдөлд бага гүний 3-D цахилгаан дамжуулах биетүүдийн нэгэн төрлийн бус тархалт нь цэнэгийн хуримтлал үүсгэх бөгөөд үүнээс улбаалан гальваник дисторшн бий болдог. Энэ нь нэг үгээр цахилгаан дамжуулалтын градиентийн өөрчлөлт эсвэл тасалдал дээр цахилгаан цэнэг хуримтлагдсанаас үүсдэг (Meng et al. (2021)). Гальваник дисторшн тандалтын муруйн бүх давтамжийн утгууд дээр орших бөгөөд фазын муруй бага зэрэг өөрчлөлттэй байдаг бол төлөөллийн эсэргүүцлийн муруй логарифмын масштабаар бүхэлдээ шилжихэд хүрдэг (Meng et al. (2021)). Гальваник дисторшныг таних нэгэн хэмжигдэхүүн бол фаз тензор юм. Фаз тензор нь импеданс тензорын бодит утгаар тодорхойлогдох бодит утгатай байх тул гальваник дисторшноос үл хамаарна.

$$\Phi = \text{Re}(Z)^{-1} \text{Im}(Z) \quad (7)$$

Фаз тензорыг анх (Caldwell et al., 2004) тагшилцуулсан бол Фаз тензорын шинж чанар хэмжээний талаарх математик гаргалгааг (Egbert & Booker, 1986) баталсан байдаг. Өнөөдөр МТ-д ИТ-ээс гадна ФТ-ийг мөн загварчилж болдог. ФТ-ийн загварчлалыг зөвхөн 3-D орчинд хэрэглэдэг. Энэ судалгааны ажилд бид фаз тензорын агуулж буй орчны хэмжээс ба геоцахилгаан тогтцын чиглэлийн утгыг тодорхойлон тайлал хийсэн.

3. МТ өгөгдөл

3.1. МТ хэмжилт

Булган аймгийн Могод сум орчмын цахилгаан дамжуулах чадварын тогтцыг тодорхойлох зорилгоор 2020 оноос эхлэн ШУА-ийн Одон орон геофизикийн хүрээлэнгийн соронзон судлалын салбар тухайн бүс нутагт хэсэгчлэн МТ хэмжилт хийж эхэлсэн. Үүнээс өмнө ((Batmagnai et al., 2019)) нар тухайн бүс нутагт анхны МТ ба соронзон хэмжилт хийж байсан ба үр дүнд нь тухайн бүс нутгийн региональ 1-D загварыг тодорхойлсон ба тухайн бүс нутгийн царцдасны зузааныг 45 км гэж үнэлсэн байдаг. Гэвч МТ тоног төхөөрөмжийн гачигдлаас хамааран өгөгдлийн чанар муу байсан бөгөөд цаашид нарийвчилсан МТ судалгаа хийх шаардлагатай гэж дүгнэсэн байдаг. Иймд бидний 2020 оноос өнөөдрийг хүртэл хийсэн МТ хэмжилт нь тухайн бүс нутгийн цахилгаан дамжуулах чадварын загварыг олон хэмжээст орчинд өндөр нарийвчлалтайгаар гарган авах үндсэн зорилготой байсан. Бид МТ хээрийн хэмжилтийн ажлыг өгөгдлийн чанар ба судалгааны ажлын хамрах хүрээнд тулгуурлан урьдчилсан хэмжилт ба талбайн 3-D хэмжилт хэмээн ангилан авч үздэг. Урьдчилсан МТ хэмжилтэд 2020-2022 онд хийгдсэн МТ хэмжилтүүдийг авч үзэх ба эдгээр хэмжилт нь нийт 35 цэгээс бүрдэх бөгөөд ШУА-ийн Одон орон геофизикийн хүрээлэнгийн салбарын судлаачид ЕТН Цюрихээс хэрэгжүүлж буй Цэнхэрийн халуун рашааны тогтцыг тайлбарлах зорилго бүхий r4d төслийн дэмжлэг, судалгааны ажлын грантын төслүүдээс санхүүжигдэж хийсэн.

Өмнөх урьдчилсан хэмжилтийн өгөгдөл боловсруулалт ба загварчлалын ажлын үр дүн-

Хүснэгт 1. Судалгааны талбайд хэмжсэн МТ цэгүүд.

Он	2020	2021	2022	2024	Бүгд
МТ	1	4	8	12	25
ТМТ	15	7	-	30	52
Бүх	16	11	8	42	77

гүүдээр талбайн идэвхтэй хэсэг болох Могодын хагарал болон Хульжийн халуун рашааныг хамарсан 3-D хэмжилт хийх шаардлагатай гэж дүгнэсэн байдаг. Иймээс бид 2024 онд тухайн бүс нутагт 3-D торлол үүсгэн нийт 42 цэгт МТ хэмжилт хийсэн. Зураг. 2-д Могод судалгааны талбай орчимд хийсэн МТ хэмжилтийн цэгүүдийн орон зайн түгэлтийг үзүүлсэн. Энд МТ хэмжилтийн цэгүүдийг квадрат, ТМТ цэгүүдийг ромбо дүрсээр үзүүлсэн бөгөөд хэмжилт хийгдсэн оноос хамааран өнгөөр ялгасан. Эндээс авч үзэхэд, бид судалгааны талбайд 2020-2024 оны хугацаанд 100 км урттай 2 шугамын дагуу нийт 33 МТ цэгт хэмжилт хийсэн ба Могодын хөндийд бага масштабын 3-D МТ хэмжилтийг амжилттай хийсэн байна. Энэ судалгааны ажилд Зураг. 2-д үзүүлсэн хар хүрээ доторх цэгүүдийг ашигласан.

3.2. Боловсруулалт

3.2.1 Боловсруулалтын алгоритм ба гүйцэтгэл

МТ-ийн анхдагч өгөгдөл нь цахилгаан соронзон орны өөрчлөлтийг илэрхийлэх хугацаанаас хамааран өөрчлөгдөх тоон цуваа хэлбэрээр бичигддэг. Иймд, МТ-ийн мэдээлэл боловсруулалтын анхдагч алхам бол хугацааны цуваанд анализ хийж МТ респонс болох импеданс тензор Тэг. 1 үнэлэх юм. Үүнийг хийхийн тулд хугацааны цувааг цонхнуудад хуваах, фурье коэффициентийг үнэлэх, регрессийн тэгшитгэлийн шийдийг олох гэсэн үндсэн математикийн үйлдлүүдийг мөрдөх ба эдгээрийг (Enkhzul et al., 2021) ажилд дэлгэрэнгүй дурдсан байдаг.

Энэ ажлын хүрээнд МТ хэмжилтийн цэг бүрд бүртгэгдсэн хугацааны цуваануудыг үндсэн бо-

ловсруулалтаас хасах мөн когерент филтерийн тусламжтайгаар нарийвчлан боловсруулалт хийсэн. Боловсруулалтад М-үнэлгээний аргад суурилсан Робаст-схемийн регрессийн арга ашигласан (Batmagnai & Sukhbaatar, 2016, 2017).

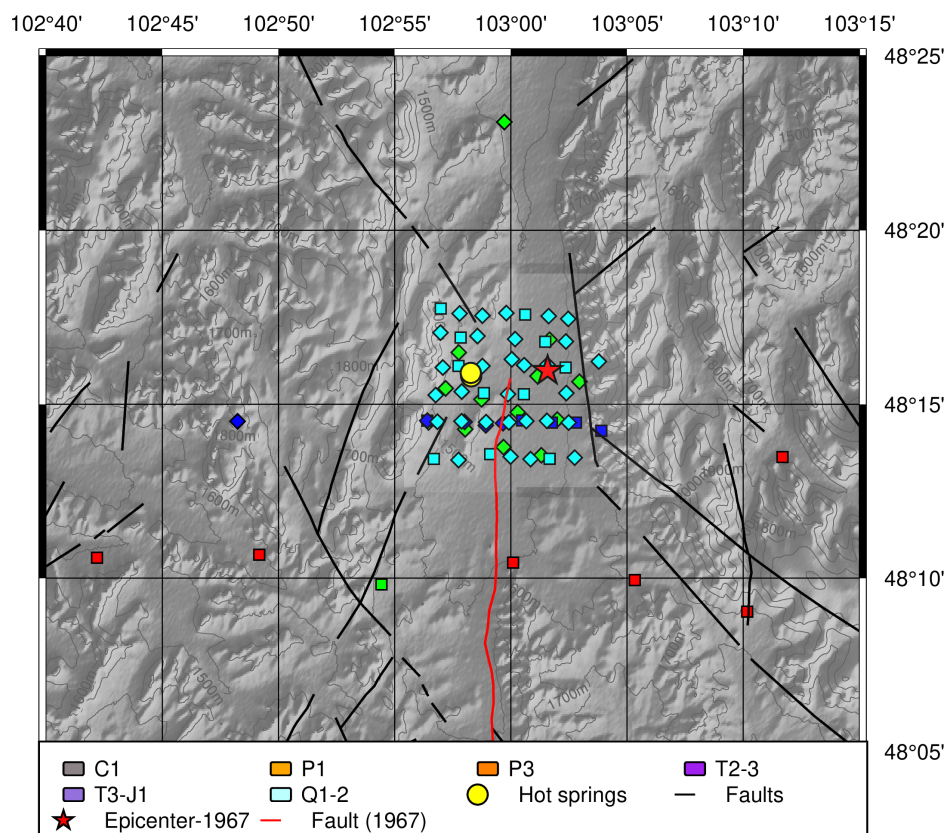
Enkhzul et al. (2022) -н 2020-2021 онд хэмжигдсэн өгөгдлийн шинж чанарын талаар дэлгэрэнгүй авч үзсэн. Зураг. 3-д 2022 ба 2024 онд хэмжилтийн өгөгдлөөс үнэлэн авсан тандалтын муруй болох төлөөллийн эсэргүүцэл Тэг. 2 ба импедансийн фазийн муруйг Тэг. 3 жишээ болгон үзүүлэв.

3.2.2 МТ өгөгдлийн шинж чанар

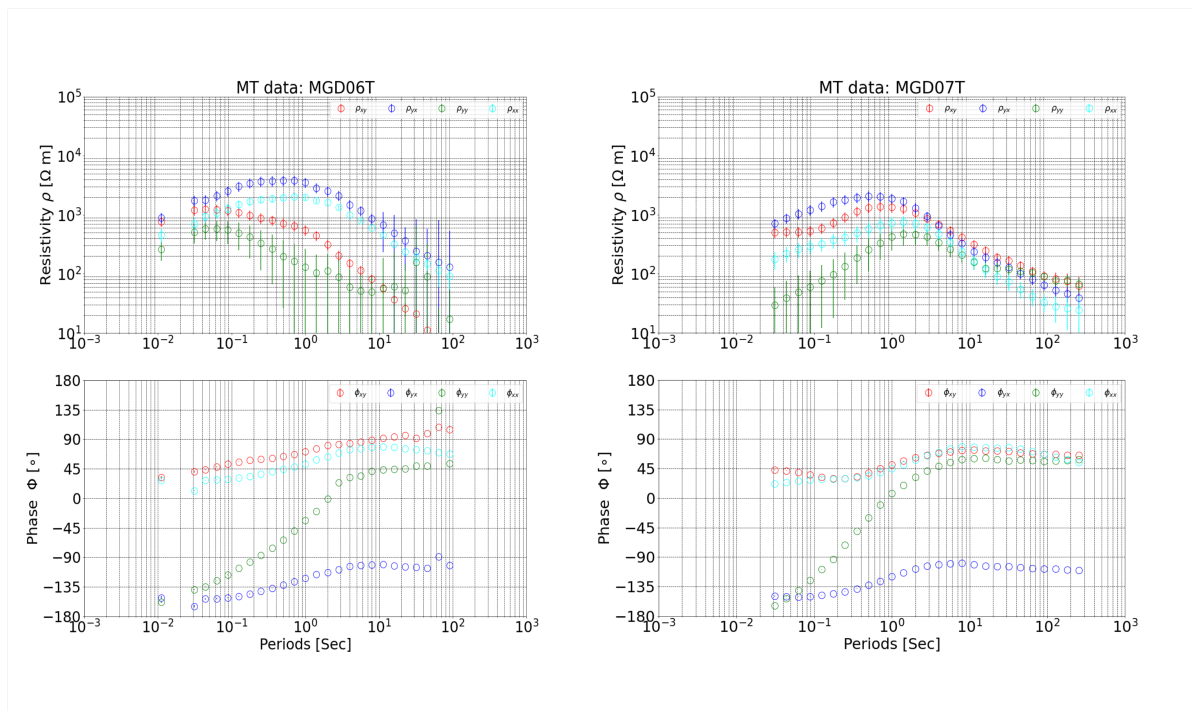
Мэдээлэл боловсруулалтын үр дүнд хэмжилтийн нийт 77 цэгээс 76 нь респонсын чанар сайн цаашид судалгаанд ашиглах боломжтой гэж үзсэн. Харин чанар муу МТ респонс нь хэмжилт хийх явцад бэлчээрийн мал, ан амьтад кабел салгаснаас байв.

Өмнө дурдсанаар энэ судалгааны ажилд Зураг 2 дахь хар хүрээ доторх нягт хэмжилтийн нийт 66 цэгийн өгөгдлийг авч үзсэн. Эдгээр цэгүүдэд бүртгэгдсэн МТ респонсийн үе ба чанарын мэдээллийг Зураг. 4-д үзүүлэв. Эндээс үзэхэд бид 0.01-700с хүртэлх урт үетэй тандалтын муруйг тооцоолж чадсан бөгөөд энэ дээд царцдасны цахилгаан дамжуулах чадварын загварын судалгаанд ашиглах бүрэн боломжтой юм.

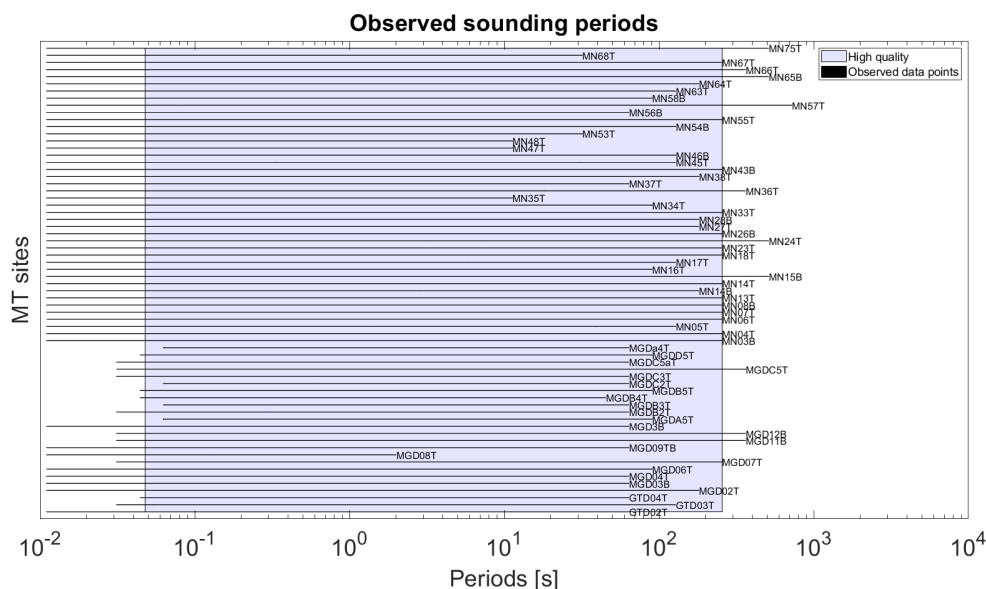
Цаашлаад эдгээр хэмжилтийн 66 цэг бүр дээр үнэлсэн ИТ-ийн утгаас скаляр импеданс болох SSQ утгыг Тэг.5 ашиглан тодорхойлон Зураг 5-ын дээд ба дунд эгнээнд саарал өнгөөр үзүүлсэн. Мөн цэг бүр дээр тодорхойлогдсон SSQ тандалтын муруйн геометр дунджийг цэнхэр муруйгаар дүрслэв (Зураг. 5-ын дээд ба дунд). Харин Зураг. 5-ын доод эгнээнд SSQ муруйнуудын дунджаар тодорхойлогдсон буюу региональ SSQ импедансийн утгаас Тэг. 5-р ашиглан үнэлсэн С-респонсийн бодит утга ба гүний хамаарлыг үзүүлэв. Эндээс авч үзэхэд тухайн судалгааны талбайд бүртгэгдсэн төлөөллийн эсэргүүцлүүдийн утга нь 10^2 зэргийн зөрүүтэй байгаа нь тухайн бүс нутгийн дор 3-D цахилгаан дамжуулах биет оршин байгааг илтгэх ба литологийн



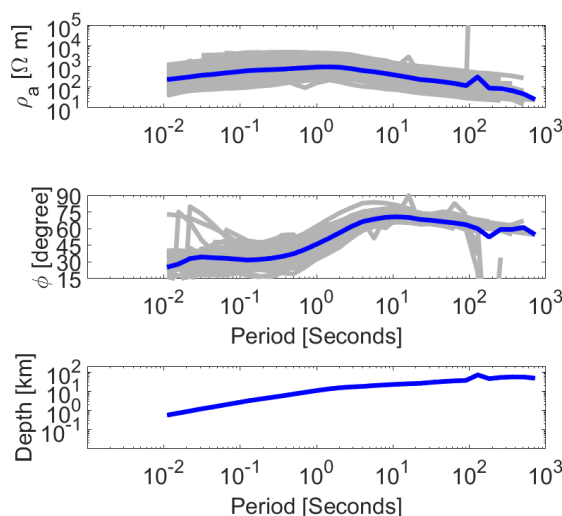
Зураг 2. Судалгааны талбай орчимд хийгдсэн МТ хэмжилтийн цэгүүдийн түгэлт.



Зураг 3. 2021 онд хэмжсэн MGD07T ба 2024 онд хэмжсэн MGD06T цэгүүдийн тандалтын муруй.



Зураг 4. MT судалгааны цэг дээр бүртгэгдсэн респонсын үе.



Зураг 5. SSQ импедансаар тодорхойлсон тандалтын муруй (дээд ба дундаж) ба C-респонсын бодит үеийн хамаарал (доод).

өөр нэгжүүд бүхий тогтоцтой байж болохыг урьдчилан ойлгож болно. Мөн цаашлаад бидний бүртгэн авсан өгөгдөл нь тандалтын гүний хувьд өндөр давтамжтай сигналын хувьд 500м ба урт үетэй сигналын хувьд 47км буюу 0.5-47км хүртэлх гүний цахилгаан дамжуулах чадварын утгыг тодорхойлох боломжтой байна.

4. Үр дүн ба хэлэлцүүлэг

4.1. Цахилгаан дамжуулах чадварын 1-D загвар

MT-д бүртгэн авсан респонсийг 1-, 2-, 3-D орчинд загварчилдаг. MT-ийн загварчлал нь цахилгаан дамжуулах орчин бүхий үе давхаргуудын ажиглагдах респонсийг Максвеллийн тэгшитгэлийн аналитик ба тоон гаргалгаар олох буюу шууд бодлого ба түүгээр ажиглагдсан онолын респонс ба ажиглагдсан респонсуудын хоорондох алдааг хамгийн бага хүртэл анхны загварыг шинэчлэх оптимизацийн аргад суурилсан урвуу бодлогуудаас бүрддэг. Энэ ажилд бид 1-D MT загварчлалын арга зүйг ашиглан судалгааны талбайн гүний үе давхаргуудын цахилгаан дамжуулах чадварын загварыг тодорхойлсон. Бид шууд бодлогын гаргалгааг хэвтээ чиглэлийн дагуу нэгэн төрлийн орчин бүхий N давхаргат 1-D загварын давталтад гаргалгааг ашигласан (Wait, 1954). Урвуу бодлогод детерминистик оптимизацийн алгоритм болох Квази-Ньютон алгоритмыг Тэг. 6-ийн шийдийг олоход ашигласан ба загварчлалыг Матлаб програмчлалын хэл дээр гүйцэтгэсэн.

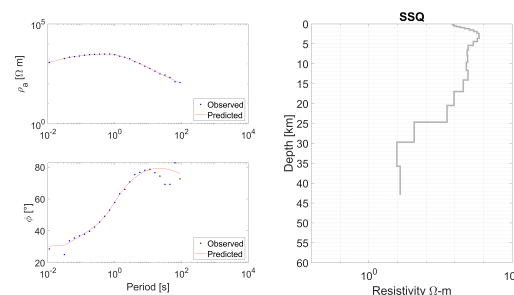
4.2. Региональ масштабын 1-D загвар

Өмнөх хэсгүүдэд авч үзсэнээр энэ өгүүлэлд

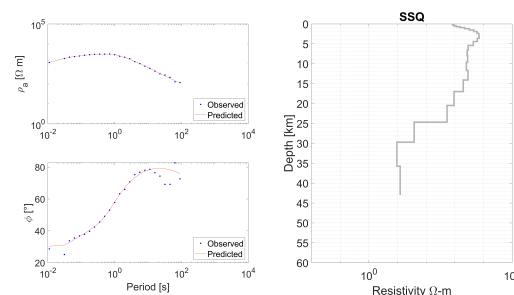
2024 онд хийсэн бага-масштабын МТ өгөгдлийг Зураг. 2 -г ашигласан. Энд Зураг. 5-д үзүүлсэн региональ дундаж SSQ тандалтын муруйд 1-D загварчлал хийсэн. Анхны загварыг сонгохдоо бид 1) ажигласан үений тоо нь үе давхаргуудын гүн, 2) үе давхаргуудын зузааныг нэгэн төрлийн орчинд дамжуулагч дэлхий рүү нэвтрэх цахилгаан соронзон долгионы гүн болох скин-эффектээр тооцоолсон бол 3) анхны загварын параметрийг бүх ажиглагдсан үе дээр тодорхойлогдсон төлөөллийн эсэргүүцлийн медиан дунджаар сонгосон. Үүний дараагаар өгөгдлийн алдааг төлөөллийн эсэргүүцлийн хувьд 5% ба фазын хувьд 1.5 байхаар сонгон авч үзэхэд, анхны загвар ба ажиглагдсан утга хоёрын хоорондох дундаж квадрат алдаа нь 37.0 байсан бол 141 давталтын дараагаар уг алдаа 1.8 болж буурсан бөгөөд энэ инверсийн тест нь уг судалгааны ажлын хувьд 1-D инверсийн хувьд хамгийн өндөр нарийвчлалтай гүйцэтгэл болж чадсан.

Дээрх тооцооллын үр дүнд ажигласан өгөгдөлд хамгийн сайн тохирсон загвар болох Могод орчмын 1-D цахилгаан эсэргүүцлийн загварыг тодорхойлсон. Зураг. 6-д, (зүүн)-д үзүүлснээр загвараас үнэлсэн ба ажигласан респонсуудын хоорондох утга нь маш сайн таарсан байна. Харин импедансийн фазын хувьд богино үе 0.01-0.02с ба 100с орчимд үнэлсэн утга нь ажиглагдсан утгаас зөрүүтэй байна. Энэ нь богино үетэй респонсийн хувьд бага гүний нэгэн төрлийн бус цахилгаан дамжуулах чадвар бүхий биет тухайн орчимд оршиж буйг илэрхийлж байна. Харин 100с дээш үетэй респонсийн хувьд нийт ажиглагдсан МТ респонсийн урт нь 100с бага байсантай холбоотойгоор үл мэдэх байдал ихэссэн байж болно. Ерөнхийдөө эдгээр фазийн хувьд ажиглагдаж байгаа зөрүүтэй байдал нь энэ судалгаанд авч үзэж буй талбайд хийсэн хэмжилтийн цэг бүрийн хувьд өөр өөр цахилгаан дамжуулах чадварын тогтоц буйг илтгэж байх бөгөөд орчин нь ерөнхийдөө 3-D тогтоцтой байж болохыг илтгэнэ. Жишээлбэл Зураг. 7-д MGD07T цэгт бүртгэгдсэн МТ респонсийн 1-D загварыг үзүүлсэн бөгөөд эндээс харахад зөвхөн нэг цэгийн хувьд загварчлал нь алдаа маш бага бөгөөд үнэлсэн ба ажиглагдсан өгөгдлүүдийн хоорондох зөрүү маш байгааг ойлгож болно. Иймд

энэхүү судалгааны ажилд авч үзэж буй 1-D загвар нь тооцооллын алдаа багатай гарган авсан босоо чиглэлийн дагуух цахилгаан эсэргүүцлийн загвар нь Могодын судалгааны идэвхтэй бүс нутгийн гүний үе давхаргуудын геоцахилгаан шинж чанарыг илэрхийлэх боломжтой гэж үзэж байна.



Зураг 6. MGD06T цэгийн цахилгаан эсэргүүцлийн 1-D МТ загвар (баруун), онолын респонс, ажиглагдсан респонс хоорондох харьцаа.



Зураг 7. MGD07T цэгийн цахилгаан эсэргүүцлийн 1-D МТ загвар (баруун), онолын респонс, ажиглагдсан респонс хоорондох харьцаа.

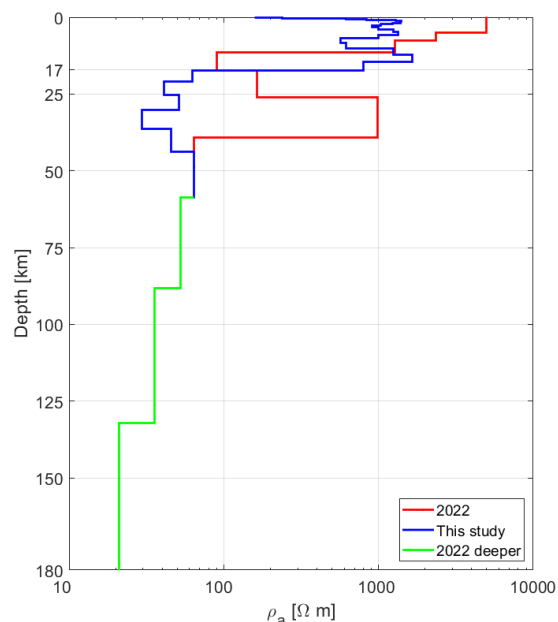
Зураг. 6-н, (баруун) -д үзүүлсэн цахилгаан эсэргүүцлийн 1-D загвар нь гүний хувьд гадаргаас 60 км хүртэл үзүүлсэн байна. Учир нь энэ судалгааны ажилд авч үзэж буй цэгүүдийн хувьд ихэвчлэн 100с хүртэлх үетэй МТ респонсуудыг бүртгэсэн. Региональ 1-D МТ загварыг Зураг. 6-н, (баруун)) Enkhzul et al. (2022)-д тодорхойлсон загвартай харьцуулахад зөвхөн царцдасны мэдээллийг агуулсан байх ба дээд мантийн геоцахилгаан тогтоц энэ загварт нэгтгэгдээгүй байна. Гэвч уг загварыг өмнөх загвартай харьцуулахад царцдасны үе давхаргын

мэдээллийг илүү нарийвчилж өгсөн давуу талтай юм. Зураг. 8-д энэ судалгааны ажлаар гарган авсан ба Enkhzul et al. (2022) загваруудыг нэгтгэн үзүүлсэн. Өмнө авч үзсэнээр бидний загвар нь дээд царцдасны мэдээллийг агуулсан бөгөөд өмнөх судалгааны загварын дээд царцдасны загвартай харьцуулахад харьцангуй нэгэн төрлийн бус байх боловч цахилгаан эсэргүүцлийн далайц нь мөн өөр байна. Энэ нь өмнөх судалгааны ажилд ашигласан өгөгдлийн шинж чанар ба загварчлалын гүйцэтгэлд ашигласан регуляцийн арга зүйгээс хамаардаг. Гэвч эдгээр загварууд нь үе давхаргуудыг илэрхийлэхдээ ижил байна.

Энэ судалгааны ажилд бид царцдаснаас дооших гүний тайллыг Enkhzul et al. (2022) ажлыг авч үзэн тайлбарлах бөгөөд энд дээд мантийн үндсэн төлөв ба астеносферийн тогтцыг үзүүлж байна гэж үзсэн. Харин өмнөх загварын хувьд царцдас давхаргын геоцахилгаан тогтцыг үндсэнд нь интрузив ба тунамал чулуулаг агуулсан дээд царцдас ба нэгэн төрлийн доод царцдас гэж ангилсан. Хэдийгээр энэ ажилд бид өмнөх тайлбарыг дагах хэдий ч бидний гарган авсан шинэ загварын шинжид тулгуурлан дараах тайллуудыг санал болгож байна.

Загварын эхний давхаргад цахилгаан эсэргүүцлийн утга 150-1500 Ом-м хүртэл өсөх 1.5 км зузаан давхарга байна. Зураг. 1-д үзүүлсэн геологийн тогтцыг авч үзвэл тухайн орчин хожуу Палеозойн ба түрүү-дунд Мезозойн формацудийг илэрхийлж болно. Геоцахилгаан тогтцын хувьд тухайн давхарга нь 2-3 төрлийн дамжуулагч орчинг агуулах бөгөөд бага гүний давхаргууд нь дөрөвдөгчийн хурдас эсвэл усаар ханасан хурдсыг үзүүлж байна. Харин 300 м доош эсэргүүцлийн утга харьцангуй тогтвортой болж буй нэгэн төрлийн литологийг илэрхийлж болно.

Гүний чулуулаг бүхий 1.5-12 км гүн буюу 10 км зузаантай 2 дахь үеийн хувьд цахилгаан эсэргүүцэл 1500-2000 Ом-м байна. Бид энэ үеийг Өмнөх судалгаанд уг орчныг түрүү-Кэймбрийн Хангайн блокоор авч тодорхойлон тайлбарласан байдаг. Гэвч энэ судалгааны хувьд тодорхойлогдсон нарийвчилсан царцдасны загварын геоцахилгаан шинж чанарын хувьд 1.5-6 км-т орших бөгөөд үүний цахилгаан эсэргүүцэл нь (Käufel et al., 2018) тодорхойлсон Хан-



Зураг 8. Могод орчмын бүс нутгийн региональ-масштабын 1-D цахилгаан эсэргүүцлийн загвар. Энд улаан ба ногоон муруйгаар 2022 оны Enkhzul et al. (2022)-ийн загварын царцдасын болон мантийн цахилгаан дамжуулах чадварын утгуудыг тус тус үзүүлсэн бол цэнхэр муруйгаар энэ судалгааны ажлын үр дүнг үзүүлсэн.

гайн блокын эсэргүүцлээс харьцангуй бага утга үзүүлж байгаа нь сонирхолтой. Гэвч уг үе давхарга нь блок ба интрузив чулуулагтай геологийн хувьд тохирч байна. Цаашлаад тухайн давхаргын төвд 2-3.5 км гүнд бүхий сул эсэргүүцлийн 800 Ом-м орчин оршиж буй нь тухайн бүс нутагт сул деформацийн бүс үүссэн байж болох эвдрэлийн бүсээр тайлбарлаж болно. Мөн 500 Ом-м эсэргүүцэл бүхий орчин 8 км гүнд ажиглагдаж байна. Иймд уг бүс нь гүний хагарлын эсвэл процессын улмаас хэв гажилд орсон байх магадлалтай.

Харин загварын 12-17 км -т цахилгаан дамжуулах чадварын утга 1600 Ом-м-ээс 700 хүртэл буурах тогтвортой байгаа нь литологийн шилжилтийн улмаар хүчлэг суларсан сул деформацийн бүс болох brittle-ductile орчныг илэрхийлж байна гэж бид үзэж байна. Мөн цаашлаад өмнөх судалгаанд (Enkhzul et al., 2022) дээд-доод

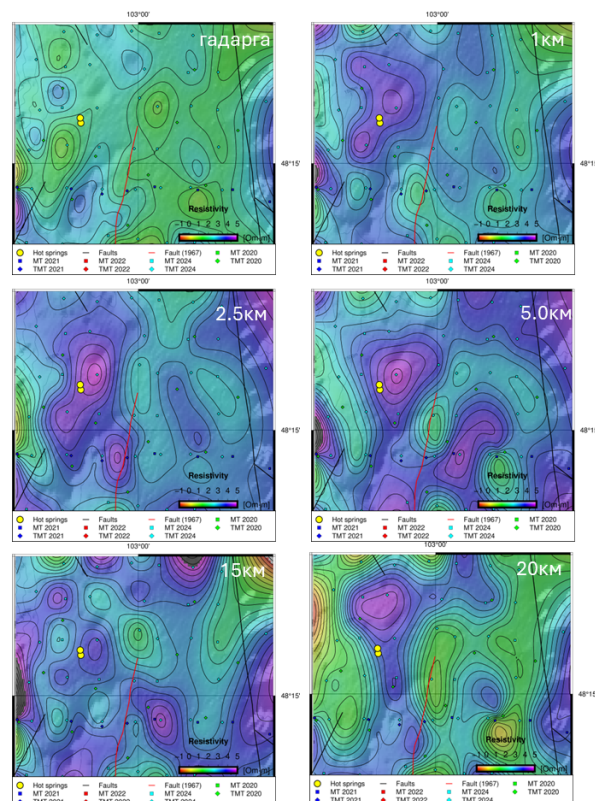
царцдасны зааг болох уг үе нь 11-17км гэж үзэж байсан нь энэ судалгаатай ижил үр дүнг үзүүлсэн.

Загвар нь 17-45км гүнд 500м-м цахилгаан эсэргүүцэл бүхий орчин агуулж байгаа нь доод царцдасны зузаантай холбоотой байх ба Мохо зааг нь энэ судалгааны хувьд 45км гэж үзэж болох нь Монгол оронд хийгдсэн бусад геофизикийн судалгааны ажлын гүнүүдтэй ойролцоо байна. Тухайн давхаргад цахилгаан эсэргүүцэл нь 200м-м хүрсэн геоцахилгаан шинж чанар бүхий үеүүд ажиглагдаж байгаа нь тухайн үе давхаргууд нь доод царцдасд агуулагдаж буй мантийн хэсэгчилсэн хайлалттай холбоотой материалууд байж болох юм.

4.3. Могод талбайн цахилгаан дамжуулах чадварын түгэлт

Бид энэ судалгааны ажилд Зураг 2 дахь хар хүрээ доторх физик цэг бүрээс SSQ тандалтын муруйг үнэлэн 1-D загварчлалыг өмнөх хэсэгт дурдсаны дагуу хийсэн. Уг загварчлалын хувьд дундаж квадрат алдаа нь 0.8-1.4 байсан нь инверсийн гүйцэтгэл мөн сайн болохыг илэрхийлнэ (Зураг. 7-г үз). Үүний үр дүнд хэмжилтийн талбайн цахилгаан эсэргүүцлийн түгэлтийг өөр өөр гүний хувьд зураглах боломж бүрдсэн. Цахилгаан эсэргүүцлийн түгэлтийн зураглалыг 2-D интерполяцийн аргад тулгуурлан гүйцэтгэсэн. Зураг. 9-д цахилгаан эсэргүүцлийн түгэлтийн загваруудыг гадарга, 1км, 2.5км, 5км, 10км, 20км гүнд үзүүлсэн. Эндээс авч үзэхэд бага гүнд буюу гадарга орчимд цахилгаан дамжуулах чадварын утга нь харьцангуй их буюу эсэргүүцэл багатай тогтоц нь хөндий орчимд илүү ажиглагдах бөгөөд энэ нь нүх сүвэрхэг тунамал чулуулаг болон сэвсгэр хурдсыг үзүүлж байна. Харин 1-5км гүний цахилгаан эсэргүүцлийн загварыг авч үзвэл хөндийд ажиглагдаж байсан сул цахилгаан эсэргүүцлийн биетүүд өндөр эсэргүүцэлтэй биетүүдээр солигдох бөгөөд талбайн төвийн хэсэгт сул ба баруун хойд хэсэгт өндөр эсэргүүцэл бүхий биетүүд үүсэх ба эдгээр нь мөн Могодын хагарал ба Хульж халуун рашааны байрлалтай давхцаж байна. Цахилгаан эсэргүүц-

лийн утга 15 км гүнд нэгэн төрлийн бус жижиг дамжуулагч орчнуудыг илэрхийлж байна. Энэ нь литологийн төлөв солигдож буйтай холбон тайлбарлаж болно. Ерөнхийдөө 20км гүнээс орчин нь цахилгаан дамжуулах чадвар өндөртэй байх боловч талбайн хойд хэсэгт цахилгаан эсэргүүцэл өндөртэй орчин оршиж байна. Уг орчин нь магадгүй МТ өгөгдөлд ажиглагдсан статик шилжилттэй холбоотой байж болно.



Зураг 9. Могодын судалгааны талбайн цахилгаан эсэргүүцлийн түгэлт.

5. Дүгнэлт

Энэ судалгааны ажлаар бид Могодын талбайд 2024 онд хийгдсэн МТ хэмжилтийн өгөгдөл түүний мэдээлэл боловсруулалт ба загварчлалын талаар авч үзсэн. Үүнээс гарган авсан цахилгаан эсэргүүцлийн загвар нь царцдасны геоцахилгаан тогтцыг нарийвчлан тодорхойлсон бөгөөд тухайн загварыг өмнөх судалгааны ажлаар тодорхойлсон региональ гүний тогтцын загвартай нэгтгэн ашиглах нь зүйтэй гэж үзсэн.

МТ-ийн 1-D цахилгаан дамжуулах чадварын загварт тулгуурлан бид дээд царцдасны хувьд тунамал чулуулаг болон интрузив чулуулгийн зузааныг 1.5 км ба 5 км гэж тодорхойлсон бөгөөд дээд, доод царцдасны хил заагийн гүн нь 11 км байна. Энэ нь өмнөх судалгааны үр дүнтэй тохирч байна. Цаашлаад доод царцдасны хувьд хүчтэй цахилгаан дамжуулах чадварын гажил ажиглагдсан ба үүнийг бид мантийн хэсэгчилсэн хайлалттай холбон авч үзсэн.

МТ 1-D инверсд тулгуурлан гарган авсан өөр өөр утга бүхий гүний цахилгаан эсэргүүцлийн түгэлтийн зураглалаас Могодын үндсэн хагарлын доор хүчтэй мөн бүс нутагт хэд хэдэн хэвтээ чиглэсэн цахилгаан дамжуулах чадварын биетүүд ажиглагдсан. Эндээс Хульжийн халуун рашаан нь тухайн бүс нутагт оршиж буй геологийн хагарлуудын хөндлөн огтлол дээр оршиж болно гэсэн анхдагч тайлал өгөхөд хүргэсэн.

Цаашид бид тухайн бүс нутагт бүртгэн авсан өгөгдөлд 3-D инверсийн аргаар цахилгаан эсэргүүцлийн загварыг гарган авч судалгааны ажлын үр дүнтэй нэгтгэн тайлал хийхээр төлөвлөж байна.

Талархал

Энэхүү өгүүлэлд ашигласан МТ өгөгдлийг бүртгэн авах хээрийн ажилд оролцсон Х.Цагаансүх, Могод дахь Одон орон геофизикийн хүрээлэнгийн ажилчин н.Баатархүү, Могод сумын ерөнхий боловсролын сургуулийн захиргаанд хээрийн ажилд дэмжлэг үзүүлэн ажилласанд гүнээ талархал илэрхийлье.

Ашигласан номзүй

Aster, R. C., Borchers, B., & Thurber, C. H., 2018. *Parameter estimation and inverse problems*, Elsevier.

Avdeev, D. & Avdeeva, A., 2008. 3d mt inversion of the dias secret dataset.

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 Astornomy*, **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.

Buyantogtoh, B., Dorjdawaa, M., Munkhsaikhan, A., Batnyam, E., & Undarmaa, H., 2022. Могодын идэвхитэй хагарлын бүсэд хийсэн гравиметрийн судалгааны үр дүн, *Geophysics and Astronomy*, **xxx**(9), 84–88.

Caldwell, T. G., Bibby, H. M., & Brown, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor, *Geophysical Journal International*, **158**(2), 457–469.

Chave, A. D. & Jones, A. G., 2012. *The magnetotelluric method: Theory and practice*, Cambridge University Press.

Comeau, M. J., Rigaud, R., Batmagnai, E., Tserendug, S., Kuvshinov, A., Becken, M., & Demberel, S., 2024. Insights into the structure of the mongol-okhotsk suture zone, adaatsag ophiolite, and tectonic boundaries of the central asian orogenic belt (mongolia) from electrical resistivity imaging and seismic velocity models, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **129**(4), e2023JB028503.

Cox, L. H. & Zhdanov, M. S., 2008. Advanced computational methods of rapid and rigorous 3-d inversion of airborne electromagnetic data, *Communications in Computational Physics*, **3**(1), 160–179.

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. Developing code for a 1-D magnetotelluric modelling by using deterministic inversion techniques, *Geophysics and Astornomy*, **8**, 94–106.

Enkhzul, B., Tserendug, S., & Batmagnai, E., 2021. Data processing and modeling of Magnetotelluric signal: For lemi-423, *Geophysics and Astronomy*, **8**, 106–118.

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.

Käufel, J. S., Grayver, A. V., & Kuvshinov, A. V., 2018. Topographic distortions of magnetotelluric transfer functions: a high-resolution 3-d modelling study using real elevation data, *Geophysical Journal International*, **215**(3), 1943–1961.

- Meng, L., Huang, Q., & Zhao, L., 2021. Removing galvanic distortion in 3d magnetotelluric data based on constrained inversion, *Pure and Applied Geophysics*, **178**(6), 2149–2169.
- Oyuntsetseg, D., 2015. *Isotopic and geochemical study of geothermal fluids in Mongolia for geothermal exploration*, Ph.D. thesis, University of Toyama.
- Rung-Arunwan, T., Siripunvaraporn, W., & Utada, H., 2016. On the berdichevsky average, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **253**, 1–4.
- Simpson, F. & Bahr, K., 2005. *Practical magnetotellurics*, Cambridge University Press.
- Swift, C. M., 1987. Fundamentals of the electromagnetic method.
- Tikhonov, A., 1950. On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust, in *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, vol. 73, pp. 295–297.
- Tsukada, K., Umeda, K., Nadmid, B., Sodnom, K., & Nuramkhaan, M., 2008. Ages from the "mogod formation" of the permian-triassic igneous rocks in the sayan-baikal belt, northern mongolia, *Bulletin of the Nagoya University Museum*, **37**, 1–12.
- Wait, J. R., 1954. Theory of electromagnetic surface waves over geological conductors, *Geofisica pura e Applicata*, **28**, 47–56.
- Weidelt, P., 1973. The inverse problem of geomagnetic induction, *Geophysical Journal International*, **35**(1-3), 379–379.
- Zorin, Y. A., Novoselova, M., Turutanov, E. K., & Kozhevnikov, V., 1990. Structure of the lithosphere of the mongolian-siberian mountainous province, *Journal of Geodynamics*, **11**(4), 327–342.