

Ховд геосоронзон станцын 2010–2022 оны өгөгдөлд суурилсан С-респонсын анхны үнэлгээ

Б.Энхзул^{а*}, Э.Батмагнай^а

а – ШУА, Одон орон геофизикийн хүрээлэн, Соронзон судлах салбар, Улаанбаатар хот

ХУРААНГУЙ

Геосоронзон гүний тандалтын арга нь геосоронзон орны урт хугацааны байгалийн хувьслыг ашиглан Дэлхийн литосфер болон дээд мантийн цахилгаан дамжуулах чадварын бүтцийг судлахад хэрэглэгддэг цахилгаан соронзон индукцийн арга юм. Монгол орны геосоронзон ажиглалтын өгөгдлийг ийм төрлийн гүний индукцийн судалгаанд ашиглах боломж одоогоор хязгаарлагдмал судлагдсан хэвээр байна. Энэхүү судалгаанд геосоронзон гүний тандалтын стандарт арга зүйг Ховд геосоронзон станцын бодит ажиглалтын өгөгдөлд хэрэгжүүлж, С-респонсын үнэлгээ хийх арга зүйн боломжийг шалгав. Арга зүйн хэрэгжилтийг баталгаажуулах зорилгоор литосфер болон дээд мантийн төлөөлөх цахилгаан дамжуулах чадварын хэд хэдэн 1-D синтетик загварыг ашиглан С-респонсын мэдрэг чанарыг үнэлсэн. Эдгээр туршилтаар өнгөц дамжуулагч бүтэц, өндөр эсэргүүцэлтэй литосфер, дээд мантийн дамжуулагч бүс зэрэг гео-цахилгаан нөхцөлүүд С-респонсын бодит болон хуурмаг байгуулагчид хэрхэн нөлөөлөхийг харьцуулан тодорхойлов. Ховд станцын 2010–2022 оны Н, D, Z байгуулагчдын тасралтгүй ажиглалтын өгөгдөлд хугацааны синхрончлол, чанарын хяналт, тренд арилгалт, шүүлтүүр, дахин дээжлэлт болон спектрийн анализын боловсруулалт хийж, давтамжийн муж дахь холбогч функцүүд болон комплекс С-респонсыг үнэлэв. Үр дүнгээс харахад 7 өдрөөс урт үеийн мужид coherence² нь 0.7–0.9 хүрч, С-респонсын бодит болон хуурмаг байгуулагчид синтетик загварчлалын ерөнхий хандлагатай физикийн хувьд нийцтэй байна. Энэхүү ажил нь Ховд станцын урт хугацааны геосоронзон ажиглалтын өгөгдөлд С-респонсын стандарт үнэлгээг хэрэгжүүлэх боломжтойг харуулсан арга зүйн эхний үр дүн юм. Судалгаанд цахилгаан дамжуулах чадварын инверсийн тооцоолол хийгдээгүй тул гарган авсан С-респонсыг тодорхой геологийн бүтэц эсвэл дамжуулагч аномалитай шууд холбон тайлбарлаагүй. Харин энэхүү үр дүн нь Монгол орны геосоронзон өгөгдлийг ашигласан цаашдын олон станцын геосоронзон гүний тандалт болон 2-D, 3-D цахилгаан дамжуулах чадварын инверсийн судалгаанд арга зүйн суурь мэдээлэл болох ач холбогдолтой.

Keywords: С-респонс, Цахилгаан дамжуулах чадвар, Геосоронзон орны хувьсал, Холбогч функцүүд, Спектрийн анализ, Ховд станц

I. УДИРТГАЛ

Дэлхийн литосфери болон дээд мантийн цахилгаан дамжуулах чадварын бүтцийг ойлгох нь тектоник үйл явц, дулааны горим болон шингэн төлөвийн тархалтыг тайлбарлахад үндсэн суурь болдог [1,13]. Цахилгаан дамжуулах чадвар нь температур, хэсэгчилсэн хайлалт болон шингэн төлөвийн оршихуйд маш мэдрэг байдаг тул цахилгаан соронзон (ЦС) аргууд нь энэхүү зорилгод онцгойлон тохирдог [13,16]. Эдгээр аргуудын дундаас Геосоронзон гүний тандалтын (ГГТ) арга нь Дэлхийн соронзон орны байгалийн хувьслийг ашиглан гүний цахилгаан дамжуулах чадварын бүтцийг тандан судалдаг [1,2].

ГГТ арга нь хугацаанаас хамааран өөрчлөгдөх гадаад геосоронзон орнууд болон тэдгээрийн Дэлхийн дотоодод индукцлагдсэн респонсийн анализад тулгуурладаг. Соронзон орны хэвтээ ба босоо байгуулагчдын хоорондох давтамжаас хамаарсан холбогч функцүүдийг үнэлснээр газрын гүний цахилгаан дамжуулах чадварын өөрчлөлтийг гүнээс хамааруулан тодорхойлох С-респонс функцийг гарган авах боломжтой [2,18]. Магнетотеллурикийн (МТ) аргуудтай харьцуулахад ГГТ-д зөвхөн соронзон хязгаарлагдмал эсвэл ажиглалтын хамрах хүрээ сийрэг бүс нутгуудад уг аргыг хэрэглэхэд онцгой давуу талтай байдаг [10,16]. Энэ аргын онолын суурь нь эртнээс тавигдсан хэдий ч Төв Азийн

*enkhzul@iag.ac.mn

бүс нутагт ГГТ аргын хэрэглээ харьцангуй хязгаарлагдмал байсаар ирсэн. Монгол улс нь Сибирийн кратон болон Хойд Хятадын блокийн хооронд орших геодинамикийн хувьд нарийн төвөгтэй бүс нутаг бөгөөд идэвхтэй тектоник, эх газрын дотоод дахь деформаци болон литосферийн үлэмж хэмжээний нэгэн төрлийн бүс шинж чанараараа онцлог юм. Өмнөх геофизикийн судалгаанууд, ялангуяа МТ-ийн судалгаанууд нь зарим бүс нутгуудын цахилгаан дамжуулах чадварын бүтцийн талаар сайн үр дүнгүүдийг өгсөн боловч Монголын өргөн уудам нутаг дэвсгэрийн судалгаа сайн хийгдээгүй хэвээр байна. Сүүлийн жилүүдэд Ховд, Улаанбаатар, Завхан, Дундговь зэрэг станцуудыг багтаасан геосоронзон оргилуудын өргөжилт нь бүс нутгийн хэмжээнд ГГТ-ийн аргуудыг хэрэглэх шинэ боломжуудыг бүрдүүлж байна.

Энэхүү судалгаагаар бид Монгол улсад ГГТ аргыг анх удаа хэрэгжүүлсэн үр дүнг танилцуулж байгаа бөгөөд үүнд онолын загварчлал болон бодит ажиглалтын анализыг хослуулан авч үзэв. Онолын туршилтуудыг цахилгаан дамжуулах чадварын хяналттай загваруудын нөхцөл дор С-респонсын функцүүдийн мэдрэг чадвар болон найдвартай байдлыг үнэлэх зорилгоор боловсруулсан. Эдгээр сорилтууд нь бодит өгөгдлийг тайлах, мөн арга зүйн хязгаарлалтуудыг тодорхойлоход шаардлагатай суурь орчныг бүрдүүлж байна. Үүний дараа, бид Ховд станцын өгөгдлийг ашиглан холбогч функцүүдийг үнэлж, литосфери болон дээд мантийн гүнд харгалзах хугацааны өргөн мужийг хамарсан С-респонсын анхны үнэлгээнүүдийг гарган авлаа.

Энэхүү ажлын үндсэн зорилтууд нь: (1) Монгол улсад ГГТ-ийн анализыг гүйцэтгэх дахин хэрэгжүүлэх боломжтой ажлын урсгалыг боловсруулах, (2) онолын загварчлалаар дамжуулан уг аргын тооцооллын зөв хэрэгжилтийг баталгаажуулах, (3) Ховд станцын геосоронзон ажиглалтын өгөгдөлд С-респонсын үнэлгээг хэрэгжүүлэн Монголын геосоронзон өгөгдлийг ГГТ-ийн судалгаанд ашиглах арга зүйн боломжийг үнэлэхэд оршино. Энэ нь цаашид хийгдэх томоохон хэмжээний цахилгаан соронзон судалгааны үндэс суурь болох бөгөөд тус бүс нутагт одоо ашиглагдаж буй геофизикийн аргуудыг баяжуулах нэмэлт хэрэглүүр болох ГГТ-ийн боломжийг тодхон харуулж байна.

II. ГГТ АРГЫН ОНОЛЫН ҮНДЭС

Геосоронзон гүний тандалт нь газрын гүний цахилгаан дамжуулах чадварыг тодорхойлохын тулд Дэлхийн соронзон орны урт хугацааны хувьслийг ашигладаг цахилгаан соронзон индукцийн арга юм [1,2]. Эдгээр хувьслуд нь голчлон цэнэгт мандал болон соронзон мандлын гүйдлийн системээс үүсэлтэй бөгөөд тэдгээр нь хугацаанаас хамааран өөрчлөгдөх гадаад соронзон орныг үүсгэдэг [5,12]. Эдгээр орнууд Дэлхийтэй харилцан үйлчлэлцэхдээ цахилгаан дамжуулах чадвартай гүний бүтцүүдэд хоёрдогч гүйдлийг индукцлэн өдөөдөг бөгөөд ингэснээр хэмжиж болохуйц хэмжээний дотоод соронзон орнуудыг бий болгодог. Цахилгаан соронзон индукцийн онолын үндсэн тэгшитгэлүүд нь Максвеллийн тэгшитгэлүүдээр тодорхойлогдоно [7,9]. Цахилгаан дамжуулах чадвар бүхий Дэлхийн дотоодод хугацаанаас хамааран өөрчлөгдөх соронзон орнууд нь цахилгаан гүйдлүүдийг үүсгэх бөгөөд энэ нь эргээд газрын гүний цахилгаан дамжуулах чадварын тухай мэдээллийг агуулсан хоёрдогч соронзон орнуудыг үүсгэдэг байна. Квази-статик дөхөлтийн $e^{-i\omega t}$ давтамжийн муж дахь Максвеллийн тэгшитгэлүүдийг дифференциал хэлбэрээр дараах байдлаар илэрхийлнэ:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega \mathbf{B} \quad (2)$$

Энд $\mathbf{E}$ - цахилгаан орны хүчлэг, $\mathbf{B}$ - соронзон индукцийн вектор (урсгалын нягт), σ - цахилгаан дамжуулах чадвар, ω - өнцгийн давтамжийг тус тус илэрхийлнэ. Максвеллийн тэгшитгэлүүдийн квази-статик дөхөлт нь цахилгаан соронзон орны долгионы шинж чанарт голлон анхаарах боломжийг олгодог. Фарадейн хуулийг Амперийн хуультай нэгтгэснээр цахилгаан соронзон долгионы тэгшитгэл дараах байдлаар гарна:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = i\omega \mu_0 \sigma \mathbf{B} \quad (3)$$

Энд μ_0 - соронзон нэвтрүүлэх чадвар болно. Энэхүү тэгшитгэл нь соронзон орны Дэлхийн дотоод руу диффузийн замаар нэвтрэх шинжийг харуулна [4,9]. Цахилгаан дамжуулах чадвар болон давтамж нь индукцийн орны нэвтрэх гүн, сулралын шинжид нөлөөлөх бөгөөд урт периодын вариаци нь илүү гүн хэсгийн цахилгаан дамжуулах чадварт мэдрэг байдаг. Энэ нь цахилгаан соронзон орнууд долгион хэлбэрээр

тархдаг бөгөөд давтамж нь нэвтрэх гүнийг тодорхойлдог болохыг илтгэж байна.

ГГТ-д цэнэгт мандал болон соронзон мандлын үүсгүүрээс гаралтай гадаад геосоронзон орны хувьслууд нь анхдагч орны үүргийг гүйцэтгэдэг. Эдгээр нь Дэлхийн дотоодод гүйдлүүдийг индукцлэн үүсгэж, улмаар хоёрдогч соронзон орнуудыг бий болгодог. Соронзон орны хэвтээ ба босоо байгуулагчдын хоорондын хамаарлыг холбогч функцүүдээр илэрхийлэх бөгөөд үүнээс С-респонсыг гарган авдаг.

А. С-респонсын тодорхойлолт

Ажиглагдсан геосоронзон орны $\mathbf{B}$ векторыг гадаад (үүсгүүрийн) болон дотоод (индукцлэгдсэн) байгуулагчдын нийлбэрээр дараах байдлаар илэрхийлж болно [2,18]:

$$\mathbf{B}(\omega) = \mathbf{B}_{ext}(\omega) + \mathbf{B}_{int}(\omega) \quad (4)$$

Энд $\mathbf{B}_{ext}$ болон $\mathbf{B}_{int}(\omega)$ нь Дэлхийн гадаад болон дотоодод явагдах цахилгаан соронзон индукцээр үүсэх соронзон орныг илэрхийлнэ. Гадаад орныг дэлхийн болон бүс нутгийн хэмжээнд орон зайн хувьд ерөнхийдөө жигд гэж үздэг бөгөөд харин дотоод орон нь Дэлхийн доторх цахилгаан дамжуулах чадварын өөрчлөлтийн тухай мэдээллийг агуулдаг.

Геосоронзон гүний тандалтад гадаад үүсгүүрийн орныг бөмбөлөг гармоник функцээр төлөөлүүлэн илэрхийлэх замаар С-респонсын нарийн тодорхойлолтыг гаргаж авах боломжтой [2,12]. Том хэмжээний геосоронзон хувьслуудын хувьд давамгайлах үүсгүүр нь магнитосферийн цагариг гүйдэл бөгөөд энэ нь геосоронзон диполийн тэнхлэгийн дагуу бараг тэгш хэмтэй байдаг. Энэ нь бөмбөлөг гармоник ($m = 0$) дүрслэлийг ашиглах үндэслэл болдог.

Урт хугацааны геосоронзон вариацийн үед гадаад үүсгүүрийн орны том хэмжээний байгуулагч нь ихэвчлэн соронзон мандлын цагираг гүйдлийн системтэй холбоотой байдаг. Энэ үүсгүүр нь геосоронзон диполийн тэнхлэгийн дагуу ойролцоогоор тэгш хэмтэй гэж үзэж болох тул эхний эрэмбийн зональ бөмбөлөг гармоник буюу $n = 1, m = 0$ байгуулагчаар төлөөлүүлэх нь геосоронзон гүний тандалтын стандарт ойролцооллын нэг юм. Энэхүү ойролцоолол нь ялангуяа хэдэн өдрөөс дээш үеийн мужид тохиромжтой бөгөөд энэ үед богино үеийн ионосферийн эх үүсвэрүүдийн харьцангуй

нөлөө буурч, дэлхийн хэмжээний магнитосферийн үүсгүүрийн хувь нэмэр давамгайлах хандлагатай байдаг.

Гэсэн хэдий ч бодит геосоронзон орон нь зөвхөн $n = 1$ байгуулагчаас тогтохгүй. Өндөр эрэмбийн бөмбөлөг гармоникүүд, тухайлбал $n \geq 2$ байгуулагчууд нь ионосферийн гүйдлийн систем, бүс нутгийн хэмжээний эх үүсвэрийн орон зайн жигд бус байдал, соронзон идэвхжлийн үеийн богино долгионт бүтэц болон ажиглалтын станцын байрлалтай холбоотой орон зайн нөлөөг илэрхийлж болно. Нэг станцын өгөгдөл ашигласан тохиолдолд эдгээр өндөр эрэмбийн байгуулагчуудыг найдвартай ялган салгах боломж хязгаарлагдмал байдаг. Иймээс энэхүү судалгаанд $n = 1$ ойролцооллыг урт үеийн С-респонсын арга зүйн үнэлгээнд ашигласан бөгөөд түүнийг бүс нутгийн цахилгаан дамжуулах чадварын бүтцийн бүрэн тайлбар гэж авч үзээгүй болно.

Гадаад соронзон потенциалыг V^{ext} бөмбөлөг координат системд (r, θ, ϕ) дараах байдлаар задалж болно:

$$V(r, \theta, \phi) = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \left[\varepsilon_n^m \left(\frac{r}{a} \right)^n + l_n^m \left(\frac{r}{a} \right)^{n+1} \right] P_n^{|m|} \cos(\theta) e^{im\phi} \quad (5)$$

Энд a - Дэлхийн дундаж радиус, ε_n^m ба l_n^m - харгалзан гадаад үүсгүүрийн болон дотоод респонсын коэффициентүүд, n - бөмбөлөг гармоник зэрэг, m - нь эрэмбэ, мөн $P_n^{|m|}$ - Лежандрын олон гишүүнт болно [2,12].

Гадаад болон дотоод орны бөмбөлөг гармоник коэффициентүүдийн хоорондын хамаарлаас С-респонсын тодорхойлолтыг гарган авч болно. Гармоник зэрэг n -ийн хувьд С-респонс нь дотоод ба гадаад орны коэффициентүүдийн харьцаагаар дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$C_n(\omega) = a \frac{l_n(\omega)}{\varepsilon_n(\omega)} \quad (6)$$

Энэ тохиолдолд соронзон потенциал нь орны дараах байгуулагчдыг үүсгэнэ [2,18]:

- Радиаль байгуулагч B_r (дотоод үүсгүүртэй)
- Өргөрөгийн нэмэлт байгуулагч B_θ (гадаад үүсгүүртэй)

Бөмбөлөг гармоникийн хамаарлуудыг ашиглахад эдгээр байгуулагчдын харьцаанд

геометрийн $\tan \theta$ үржигдэхүүн гарч ирдэг [2,12,18].

$$C(\omega) = \frac{a}{2} \tan \theta \frac{B_r(\omega)}{B_\theta(\omega)} \quad (7)$$

Энд θ нь геосоронзон ко-өргөрөг (Хавсралт 1-д тэгшитгэлийн гаргалгааг оруулсан). Иймд С-респонс нь өргөргөөс хамааран өөрчлөгдөнө. Дундаж өргөрөгт (тухайлбал Ховд орчимд) $\tan \theta$ нь бага гэж үзэх боломжгүй хэмжээтэй байдаг бөгөөд С-респонсыг нарийвчлалтай үнэлэхийн тулд заавал тооцож үзэх шаардлагатай. Үүнийг орхигдуулбал, ялангуяа цагираг гүйдэл давамгайлах урт хугацааны хувьслуудын үед С-респонсын далайц болон фазын аль алинд нь системчилсэн алдаа үүсгэдэг.

III. АРГА ЗҮЙ БА АЖЛЫН ДАРААЛАЛ

Энэ хэсэгт геосоронзон ажиглалтын өгөгдлөөс С-респонсыг тооцоолох арга зүйн иж бүрэн хүрээг тайлбарлаж, ГГТ онолын үндэс болон Ховд станцын бодит өгөгдөл дээрх практик хэрэгжилтийн хоорондын уялдаа холбоог системтэйгээр тодорхойлов.

А. Боловсруулалт

Боловсруулалтын ажлын дараалал нь үр дүнгийн нэгэн төрлийн байдал, статистик тогтвортой чанар болон дахин хэрэгжүүлэх боломжийг хангах зорилготой бүтэцлэгдсэн дарааллын дагуу хийгдэнэ. Геосоронзон ажиглалтын анхдагч (түүхий) өгөгдлөөс эхлэн боловсруулалтын дараалал нь: (1) өгөгдөл цуглуулах ба чанарын хяналт, (2) урьдчилсан боловсруулалт ба координат бэлтгэл, (3) давтамжийн мужруу хувиргалт хийх, (4) холбогч функцийн үнэлгээ, (5) бөмбөлөг гармоник томьёоллыг ашиглан С-респонсыг гарган авах зэрэг үе шатуудаас бүрдэнэ. Онолын өгөгдлийн туршилтууд нь мөн ижил ажлын дарааллаар хийгдэх тул хяналттай загварууд болон бодит ажиглалтын үр дүнгүүдийг шууд харьцуулах боломжийг олгодог.

В. Өгөгдөл бүртгэх ба Боловсруулалт

Энэхүү судалгаанд Ховд станцад бүртгэгдсэн геосоронзон орны тасралтгүй хэмжилтийн B_x , B_y , B_z байгуулагчдын өгөгдлийг үндсэн өгөгдлийн сан болгон ашиглав (Зураг 1). Спектрийн анализ хийхээс өмнө өгөгдлийн бүрэн байдал, хугацааны тасралтгүй байдал, түүвэрлэлтийн нэгэн төрлийн байдал болон

хэмжилтийн чанарыг шалгасан. Нэгэн жигд хугацааны алхмыг хангах зорилгоор цагийн тэмдэглэгээг нягталж, шаардлагатай хэсгүүдэд хугацааны синхрончлол болон дахин түүвэрлэлтийн засвар хийв.

Урьдчилсан боловсруулалтын шатанд босго утгад суурилсан чанарын шалгалтаар огцом үсрэлт, хэвийн бус утга болон багажийн гаралтай илэрхий алдаатай хэсгүүдийг илрүүлж хассан. Богино хугацааны тасалдал болон цөөн тооны алдагдсан утгыг интерполяциар нөхсөн бол удаан хугацааны тасалдалтай, эсвэл тогтвортой бус хэсгүүдийг спектрийн анализад ашиглаагүй. Мөн цахилгаан соронзон индукцийн урт үеийн хувьслыг гажуудуулж болох багажийн суурь шугамын өөрчлөлт болон удаан хугацааны хиймэл трендийг тренд арилгах аргаар хасав [3,8].

Анхны өндөр нягтралтай өгөгдөлд өндөр давтамжийн санамсаргүй шуугианы нөлөөг бууруулах зорилгоор Гауссын жигдрүүлэгч фильтр хэрэглэж, өгөгдлийг 1 минутын дундаж утгад дахин дээжлэв [8,14]. Энэхүү шүүлтүүр нь богино үеийн хэлбэлзэл болон хэмжилтийн санамсаргүй шуугианыг бууруулах боловч энэ судалгааны үндсэн зорилго болох 7 өдрөөс урт үеийн геосоронзон вариацийн ерөнхий хэлбэрт мэдэгдэхүйц нөлөө үзүүлэхгүй. Иймээс жигдрүүлэлт болон дахин дээжлэлт нь урт үеийн С-респонсын үнэлгээнд тохиромжтой, статистикийн хувьд тогтвортой оролтын өгөгдөл бэлтгэх зорилготой болно [3].

Физик нэгэн төрлийн байдлыг хангахын тулд соронзон орны байгуулагчдыг нэг ижил координатын системд илэрхийлэв. Хэмжилтийн өгөгдөлд газарзүйн болон геосоронзон координатын ялгаа шаардлагатай тохиолдолд харгалзах эргэлт болон координатын хувиргалтыг хийсэн. Хүчтэй соронзон шуурга, багажийн эвдрэл, эсвэл өгөгдлийн тогтворгүй байдал илэрсэн интервалуудыг тусад нь шалгасан. Гэхдээ ГГТ-ийн анализ нь соронзон мандлын урт хугацааны үүсгүүртэй холбоотой вариацийг ашигладаг тул геомагнит гаралтай урт үеийн үндсэн хувьслыг бүрэн хасахгүйгээр, зөвхөн чанарын шаардлага хангахгүй хэсгүүдийг боловсруулалтаас хасав [12,17].

С. Давтамжийн мужийн хувиргалт

Геосоронзон гүний тандалтын арга нь хугацаанаас хамааран өөрчлөгдөх соронзон орны индукцийн хариуг давтамжийн мужид

үнэлдэг тул урьдчилан боловсруулсан хугацааны цувааг спектрийн анализад шилжүүлэв. Үүний тулд хугацааны цувааг нэг сарын урттай спектрийн сегментүүдэд хувааж, хөрш сегментүүдийг 50%-ийн давхцалтайгаар сонгов. Нэг сарын сегментийн урт нь 7 өдрөөс урт периодын вариацийн спектрийн шинжийг үнэлэхэд шаардлагатай давтамжийн нягтралыг хангахын зэрэгцээ олон сегментээс спектрийн үнэлгээ хийх боломж олгоно. Харин 50%-ийн давхцал нь спектрийн сегментийн тоог нэмэгдүүлж, дараагийн дундажлалтын статистик тогтвортой байдлыг сайжруулахад ашиглагдав.

Спектрийн нэвчилтийг бууруулах зорилгоор сегмент бүрт Hann цонхны функцийг хэрэглэж, дараа нь дискрет Фурьегийн хувиргалтаар соронзон орны байгуулагчдыг давтамжийн мужид шилжүүлэв. Сегмент бүрийн авто-спектр болон кросс-спектрийг тооцоолж, нэг сарын урттай, 50%-ийн давхцалтай спектрийн сегментүүдийн үнэлгээг Welch-ийн спектрийн дундажлалтын схемээр нэгтгэв. Ингэснээр сегментүүдийн спектрийн хэлбэлзлийг дундажлан, санамсаргүй шуугианы нөлөөг бууруулж, холбогч функцийг үнэлгээний статистик тогтвортой байдлыг нэмэгдүүлэв. “Hann” нь стандарт нэршил бөгөөд “Hanning” нь өргөн хэрэглэгддэг боловч албан ёсны бус хувилбар юм.

Давтамж бүрд босоо болон хэвтээ соронзон байгуулагчдын кросс-спектрийг хэвтээ байгуулагчийн авто-спектртэй харьцуулан комплекс холбогч функцийг тодорхойлов. Үүний дараа бөмбөлөг гармоник томьёололд үндэслэн C-респонсын бодит болон хуурмаг байгуулагчдыг тооцоолов.

Энэ судалгаанд 7 өдрөөс урт периодын мужийг бүх ГТТ судалгаанд нийтлэг мөрдөгддөг универсал босго гэж үзээгүй. Харин Ховд станцын өгөгдлийн спектрийн шинж, урт хугацааны гадаад үүсгүүрийн ойролцоолол болон боловсруулалтын явцад ажиглагдсан coherence-ийн өөрчлөлтөд үндэслэн үндсэн анализын муж болгон сонгов.

Цонхны урт болон давхцлын хэмжээ нь спектрийн үнэлгээний чанарт нөлөөлөх тул нэг сарын сегмент болон 50%-ийн давхцыг судалгааны зорилготой уялдуулан сонгосон. Боловсруулалтын үр дүнд 7 өдрөөс урт периодын мужид coherence²-ийн утга 0.7–0.9 хүрсэн бөгөөд энэ нь тухайн мужид босоо болон

хэвтээ соронзон байгуулагчдын хоорондын харьцангуй өндөр спектрийн уялдааг илэрхийлж, холбогч функцийг үнэлгээний тогтвортой байдлыг дэмжиж байна.

D. Холбогч функц ба C-респонсын үнэлгээ

Энэхүү судалгаанд урт хугацааны геосоронзон вариацийн гадаад үүсгүүрийг эхний эрэмбийн гармоник ($n=1, m=0$) байгуулагчаар төлөөлөх стандарт ойролцоололд тулгуурласан нэг станцын геосоронзон гүний тандалтын (ГТТ) аргыг ашиглав [12,17]. Уг ойролцооллын үед ажиглагдсан соронзон орны хэвтээ байгуулагч (H) нь гадаад үүсгүүрийн орны өөрчлөлтийг голчлон төлөөлөх бол босоо байгуулагч (Z) нь Дэлхийн цахилгаан дамжууллын бүтцээс шалтгаалах индукцийн хариу үйлчлэлд илүү мэдрэмтгий байдаг. Иймд (H) ба (Z) байгуулагчдын хоорондын хамаарлыг ашиглан геосоронзон индукцийн респонсыг скаляр хэлбэрээр тодорхойлох боломжтой.

Холбогч функцийг бүрэн векторыг (T_x, T_y) үнэлэхийн оронд давтамжийн мужид босоо болон хэвтээ орны утгыг дараах байдлаар шууд холбож үзнэ:

$$Z(\omega) = T(\omega)H(\omega) \quad (8)$$

энд $T(\omega)$ нь давтамжаас хамаарсан комплекс холбогч функц юм. Холбогч функцийг кросс-спектр анализын тусламжтайгаар дараах байдлаар үнэлнэ [8,15]:

$$T(\omega) = \frac{S_{ZH}(\omega)}{S_{HH}(\omega)} \quad (9)$$

энд $S_{ZH}(\omega)$ - босоо болон хэвтээ байгуулагчдын хоорондын кросс-чадлын спектр нягт, харин $S_{HH}(\omega)$ - хэвтээ орны авто-чадлын спектр нягт юм. Спектрийн үнэлгээний статистик тогтвортой байдал болон найдвартай байдлыг нэмэгдүүлэх зорилгоор хугацааны мужийг хоорондоо давхцсан олон цонхонд хувааж, цонх тус бүрээс тооцсон спектрүүдийг дундажлах аргыг хэрэглэв. C-респонсыг Тэгш. 7-8-д гаргасан бөмбөлөг гармоник томьёоллыг ашиглаж, $B_\theta \approx H$ болон $B_r \approx Z$ -ийг орлуулан тооцоолно [2,12,18].

Энэхүү томьёолол нь бүрэн тензорын үнэлгээ хийх шаардлагаас зайлсхийж, бодит (ажиглалтын) өгөгдлөөс C-респонсыг шууд бөгөөд тогтвортой үнэлэх боломжийг олгодог. Энэ нь нэг станцын анализ болон цагираг

гүйдлийн таамаглал биелэх урт хугацааны сигналуудад онцгойлон тохиромжтой юм. Гарган авсан комплекс С-респонс нь далайц болон фазын мэдээллийг зэрэг агуулах бөгөөд эдгээр нь газрын доорх цахилгаан дамжуулах чадварын өөрчлөлтийг тайлбарлахад зайлшгүй шаардлагатай байдаг.

Энэхүү ойролцоолол нь нэг станцын өгөгдөлд С-респонсыг тогтвортой үнэлэх боломж олгодог боловч өндөр эрэмбийн бөмбөлөг гармоникүүд, гадаад үүсгүүрийн орон зайн жигд бус байдал болон 3-D цахилгаан дамжуулах чадварын бүтцийн нөлөөг бүрэн тусгахгүй. Иймээс гарган авсан С-респонсыг Ховд станцын ажиглалтын өгөгдөлд ГГТ-ийн стандарт аргачлалыг хэрэгжүүлсний үр дүн гэж үзсэн бөгөөд түүнийг бүс нутгийн геологийн бүтэц эсвэл тодорхой дамжуулагч аномалийн шууд нотолгоо болгон тайлбарлаагүй.

Е. Тогтвортой байдал ба найдвартай чанарыг хангах нь

С-респонсын үнэлгээний найдвартай болон тогтвортой байдлыг хангах зорилгоор хэд хэдэн аргыг хэрэгжүүлэв. Хугацааны олон цонх ашиглан спектрийн дундажлалт хийх нь санамсаргүй шуумын нөлөөг бууруулж, спектрийн үнэлгээний статистик тогтвортой байдлыг сайжруулсан. Когерент чанар багатай давтамжийн зурвасуудыг анализад оруулахгүйгээр найдваргүй холбогч функц үүсэхээс сэргийлэв. Мэдрэг чадварын анализыг цонхны урт, урьдчилсан боловсруулалтын параметрууд, давтамжийн түүвэрлэлтийг өөрчлөх замаар гүйцэтгэсэн бөгөөд гарсан үр дүнгүүдийг онолын загварын С-респонстой харьцуулан үнэлэв. Ялангуяа урт хугацааны вариацийн үед соронзон мандлын цагираг гүйдлийн үүсгүүр давамгайлах таамаглал хамгийн сайн биелдэг тул энэ хугацааны мужийн респонсуудыг үндсэн анализад ашигласан.

Г. С-респонс үнэлэх алгоритмын ажлын дараалал

Ховд станцын геосоронзон ажиглалтын өгөгдлөөс С-респонсыг үнэлэх боловсруулалтын дарааллыг дахин хэрэгжүүлэх боломжтой ажлын дараалал хэлбэрээр зохион байгуулав. Энэхүү дараалал нь анхдагч соронзон орны хугацааны цуваанаас эхлэн чанарын хяналт, урьдчилсан боловсруулалт, давтамжийн мужийн спектрийн үнэлгээ, холбогч функцийн

тооцоолол, coherence²-ийн шалгалт болон бөмбөлөг гармоник томьёололд суурилсан комплекс С-респонсын үнэлгээг багтаана.

Боловсруулалтын эхний шатанд Ховд станцын B_x , B_y , B_z буюу H , D , Z байгуулагчдын тасралтгүй хугацааны цувааг уншиж, өгөгдлийн бүрэн байдал, хугацааны синхрончлол болон түүвэрлэлтийн нэгэн төрлийн байдлыг шалгав. Дараа нь огцом үсрэлт, хэвийн бус утга, хэмжилтийн тасалдал болон багажийн гаралтай илэрхий алдаатай интервалуудыг чанарын хяналтаар илрүүлж, шаардлага хангахгүй хэсгүүдийг боловсруулалтаас хассан.

①	Анхдагч B_x , B_y , B_z өгөгдөл (Ховд станц, 2010-2022)
②	Хугацааны синхрончлол, өгөгдлийн бүрэн байдлын шалгалт
③	Чанарын хяналт: үсрэлт, хэвийн бус утга, тасалдал
④	Тренд болон суурь шугамын хиймэл өөрчлөлтийг арилгах
⑤	Гауссын жигдрүүлэгч фильтр, 1 минутын дахин дээжлэлт
⑥	Координатын нэгэн төрлийн системд байгуулагчдыг бэлтгэх
⑦	1 сарын цонхлолт, 50%-ийн давхцал
⑧	Hanning цонх ба дискрет Фурьегийн хувиргалт
⑨	Авто- болон кросс-спектрийн үнэлгээ
⑩	Welch-ийн спектрийн дундажлалт
⑪	Холбогч функц $T(\omega)$ -ийн тооцоолол
⑫	Coherence ² ба тодорхой бус байдлын үнэлгээ
⑬	С-респонс $C(\omega)$: $\text{Re}(C)$, $\text{Im}(C)$
⑭	Синтетик/глобал загвартай харьцуулалт ба тайлбар

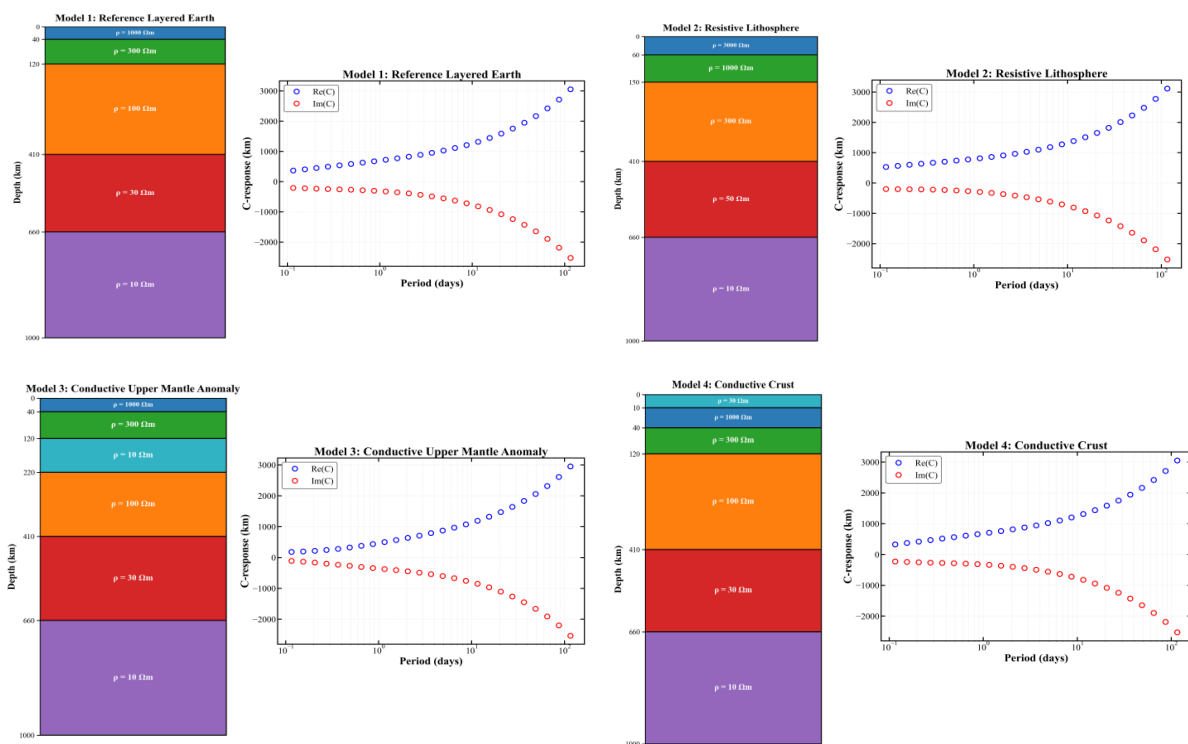
Зураг 1. Ховд станцын геосоронзон өгөгдлөөс С-респонс үнэлэх боловсруулалтын ажлын дараалал.

Богино хугацааны цөөн тасалдлыг интерполяциар нөхөж, харин урт хугацааны тасалдалтай хэсгийг спектрийн анализад ашиглаагүй. Цахилгаан соронзон индукцийн хариунд хамааралгүй багажийн суурь шугамын өөрчлөлт болон хиймэл трендийг тренд арилгах аргаар хасав. Өндөр давтамжийн санамсаргүй шуугианы нөлөөг бууруулах зорилгоор Гауссын жигдрүүлэгч филтер хэрэглэж, өгөгдлийг 1 минутын дундаж утгад дахин дээжлэв.

Давтамжийн мужийн боловсруулалтад хугацааны цувааг нэг сарын урттай цонхнуудад хувааж, хөрш цонхнуудыг 50%-ийн давхцалтайгаар сонгов. Цонх бүрт спектрийн нэвчилтийг бууруулах зорилгоор Hanning цонхны функц хэрэглэж, дараа нь дискрет Фурьегийн хувиргалтаар өгөгдлийг давтамжийн мужид шилжүүлэв. Үүний дараа хэвтээ болон

босоо соронзон байгуулагчдын авто- болон кросс-спектрүүдийг тооцож, Welch-ийн дундажлалтын аргаар спектрийн үнэлгээг тогтворжуулсан.

Давтамж бүрийн холбогч функц $T(\omega)$ -ийг босоо болон хэвтээ байгуулагчдын кросс-спектр, хэвтээ байгуулагчийн авто-спектрийн харьцаагаар тодорхойлов. Холбогч функцийн статистик тогтвортой байдлыг coherence²-ийн утгаар шалгаж, 7 өдрөөс урт үеийн мужид coh² өндөр утгатай байгаа интервалуудыг C-респонсын найдвартай үнэлгээний үндсэн муж гэж авч үзэв. Эцэст нь $n = 1, m = 0$ бөмбөлөг гармоник эх үүсвэрийн ойролцооллод үндэслэн комплекс C-респонс $C(\omega)$ -ийг тооцоолж, түүний бодит $Re(C)$ болон хуурмаг $Im(C)$ байгуулагчдыг синтетик болон глобал загварын хариутай харьцуулан үнэлэв.



Зураг 2. Синтетик 1-D цахилгаан эсэргүүцлийн загварууд болон тэдгээрээс тооцоолсон комплекс C-респонсын муруйнууд. Зүүн талын багануудад үе давхаргат цахилгаан эсэргүүцлийн $\rho(z)$ загваруудыг гүнээс хамааруулан үзүүлэв. Баруун талын графикуудад тухайн загвар бүрт харгалзах комплекс C-респонсын бодит $Re(C)$ болон хуурмаг $Im(C)$ байгуулагчдын үеос хамаарах өөрчлөлтийг харуулав. Цэнхэр тэмдэглэгээ нь $Re(C)$, улаан тэмдэглэгээ нь $Im(C)$ -ийг илэрхийлнэ. Загварууд нь суурь үелсэн Дэлхийн бүтэц, өндөр эсэргүүцэлтэй литосфер, дээд мантийн дамжуулагч аномали болон гадаргад ойр

IV. ҮР ДҮН

А. Онолын Загварын Үр Дүн

Геосоронзон гүний тандалтын С-респонсын мэдрэг чанар болон физик утгыг үнэлэх зорилгоор дөрвөн төрлийн 1-D синтетик цахилгаан эсэргүүцлийн загвар боловсруулж туршив. Эдгээр загвар нь тодорхой нэг бүс нутгийн цахилгаан дамжуулах чадварын бүтцийг сэргээх зорилготой бус, харин өөр өөр гео-цахилгаан нөхцөлүүд С-респонсын давтамжийн хариунд хэрхэн нөлөөлөхийг шалгах төлөөлөх загварууд юм. Загваруудад суурь үелсэн Дэлхийн бүтэц, өндөр эсэргүүцэлтэй литосфер, дээд мантийн дамжуулагч аномали болон гадаргад ойр дамжуулагч давхаргын нөлөөг тус тус авч үзэв.

Онолын тооцооллыг цахилгаан соронзон индукцийн квази-статик дөхөлт болон давтамжийн муж дахь диффузийн тэгшитгэлийн шийдэд тулгуурлан гүйцэтгэв. Давхарга бүрийн комплекс долгионы тоог

$$k_n = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma_n} \quad (10)$$

хэлбэрээр тодорхойлсон. Энд ω нь өнцгийн давтамж, μ_0 нь соронзон нэвтрүүлэх чадвар, σ_n нь n -р давхаргын цахилгаан дамжуулах чадвар болно. Доод хагас-огторгуйн нөхцөлөөс эхлэн давхарга бүрийн комплекс импедансыг рекурсив байдлаар тооцоолж, улмаар гадаргын индукцийн хариуг гарган авсан. Үүний дараа С-респонсыг бөмбөлөг гармоник томьёололд үндэслэн тооцоолов.

Бүх загварт үе өсөхийн хэрээр $Re(C)$ ерөнхийдөө нэмэгдэж, $Im(C)$ сөрөг утгын чиглэлд өөрчлөгдөх хандлага ажиглагдав. Энэ нь цахилгаан соронзон орны диффузийн шинжтэй холбоотой. Үе уртсахад индукцийн орны нэвтрэх гүн нэмэгдэж, С-респонс нь илүү гүн байрлах давхаргуудын цахилгаан дамжуулах чадварын нөлөөг агуулж эхэлдэг. Иймээс С-респонсын урт үеийн хэсэг нь литосфер болон дээд мантийн цахилгаан шинж чанарт илүү мэдрэг байна.

Суурь үелсэн загварт С-респонсын муруй жигд, тасралтгүй өөрчлөгдөж байгаа нь үе давхаргат орчны нийлмэл индукцийн хариуг илэрхийлнэ. Өндөр эсэргүүцэлтэй литосферийн загварт муруйн ерөнхий хэлбэр суурь загвартай төстэй

боловч $Re(C)$ -ийн түвшин тодорхой хэмжээгээр өөрчлөгдөж байна. Энэ нь өндөр эсэргүүцэлтэй давхарга индукцийн хариуны далайц болон фазын шинжид нөлөөлдгийг харуулна.

Дээд мантийн дамжуулагч аномалийн загварт С-респонсын ялгаа гол төлөв дунд болон урт үеийн мужид тодорч байна. Энэ нь урт үеийн сигнал илүү гүн нэвтэрч, дээд мантийн түвшний дамжуулагч бүтцийн нөлөөг мэдэрдэгтэй холбоотой. Харин гадаргад ойр дамжуулагч давхаргын загварт ялгаа нь богино болон дунд үеийн мужид илүү тод илэрч байна. Энэ нь богино үеийн индукцийн хариу өнгөц цахилгаан бүтэцт илүү мэдрэг болохыг харуулна.

Эдгээр синтетик туршилтаас үзэхэд С-респонсын хэлбэр, далайц болон фазын өөрчлөлт нь цахилгаан эсэргүүцлийн абсолют утгаас гадна дамжуулагч буюу өндөр эсэргүүцэлтэй үеийн байрлал, зузаан, гүний тархалтаас хамаарч байна. Өнгөц бүтэц гол төлөв богино үеийн хэсэгт, харин литосфер болон дээд мантийн цахилгаан дамжуулах чадварын өөрчлөлт дунд болон урт үеийн хэсэгт илүү тод илэрдэг. Иймээс синтетик загварчлал нь С-респонсын тооцооллын арга зүйн зөв хэрэгжилтийг шалгахын зэрэгцээ С-респонс нь газрын гүний цахилгаан дамжуулах чадварын босоо тархалтын мэдээллийг агуулдаг болохыг харуулж байна. Гэхдээ энэ мэдээллийг тодорхой геологийн бүтэцтэй шууд холбон тайлбарлахын тулд нэмэлт инверсийн тооцоолол шаардлагатай.

Иймд энэхүү синтетик загварчлал нь С-респонсын тооцооллын арга зүйн зөв хэрэгжилтийг шалгах, мөн өөр өөр гүний цахилгаан эсэргүүцлийн бүтэц С-респонсын давтамжийн хариунд хэрхэн илрэхийг физикийн хувьд тайлбарлах зорилготой болно.

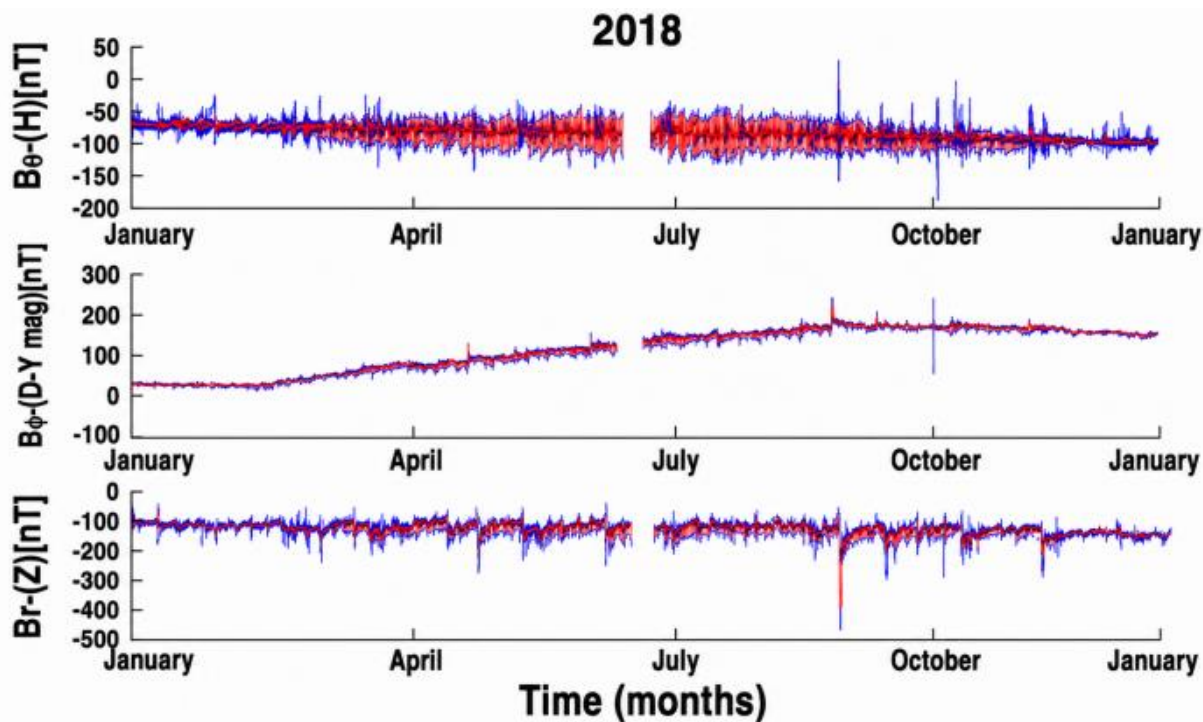
В. ХОВД СТАНЦЫН ӨГӨГДЛИЙН БОЛОВСРУУЛАЛТ БА С-РЕСПОНСЫН ҮНЭЛГЭЭ

Онолын загварчлалын үр дүнг бодит ажиглалтын өгөгдөлд хэрэгжүүлэх зорилгоор Ховдын геосоронзон вариацийн станцын 2010–2022 оны Н, D, Z байгуулагчдын тасралтгүй ажиглалтын өгөгдөлд боловсруулалт хийж, урт хугацааны вариацийг ялган авсны дараа давтамжийн муж дахь спектрийн анализ

ашиглан холбогч функц болон С-респонсын бодит, хуурмаг байгуулагчдыг үнэлэв [3,8,14].

Спектрийн анализ хийхийн өмнө өгөгдөлд хугацааны синхрончлол, чанарын хяналт, алдагдсан утгуудын интерполяц болон өндөр давтамжийн шуугианыг бууруулах урьдчилсан боловсруулалтыг хийв. Анхны 5 секунд

хэмжилтийг Гауссын жигдрүүлэгч филтр ашиглан 1 минутын дундаж өгөгдөл болгон хөрвүүлж, урт хугацааны вариацийг хадгалсан. Үүний дараа хугацааны цувааг нэг сарын урттай, 50%-ийн давхцалтай хэсгүүдэд хуваан Welch-ийн спектрийн аргаар чадлын болон харилцан спектруудийг тооцоолж, эдгээрийн дундаж утгаас холбогч функц болон С-респонсын үнэлгээг гарган авсан.



Зураг 3. 2018 онд Ховд геосоронзон станцад бүртгэгдсэн H , D , Z соронзон орны байгуулагчдын хугацааны цуваа. Цэнхэр муруй нь анхны 5 секундийн түүвэрлэлтийн өгөгдөл, улаан муруй нь урьдчилан боловсруулалтын дараах 1 минутын дундаж өгөгдлийг илэрхийлнэ.

Ховд станцд 2018 онд бүртгэгдсэн геосоронзон орны H , D , Z байгуулагчдын хугацааны цувааг Зураг 3-т үзүүлэв. Цэнхэр муруй нь анхны 5 секундийн давтамжтай хэмжилтийн өгөгдлийг, улаан муруй нь урьдчилсан боловсруулалтын дараах минутын дундаж утгуудыг тус тус илэрхийлнэ. Өгөгдөлд хугацааны синхрончлол, чанарын хяналт, мэдрэгчийн тохируулга болон Гауссын жигдрүүлэгч филтрийг хэрэглэснээр өндөр давтамжийн санамсаргүй шуугианы нөлөөг бууруулж, урт хугацааны геосоронзон вариацийн үндсэн хэлбэлзлийг хадгалсан. Боловсруулсан хугацааны цуваанаас харахад геосоронзон орны үндсэн хувьсал, улирлын шинжтэй өөрчлөлтүүд болон геосоронзон идэвхжил нэмэгдсэн үеүүд тодорхой ялгарч байгаа нь урт хугацааны вариацийн үндсэн хэлбэлзэл боловсруулалтын дараа хадгалагдаж байгааг харуулж, цаашдын спектрийн болон

ГТТ-ийн анализ хийх боломжтой өгөгдөл бэлтгэгдсэнийг харуулна.

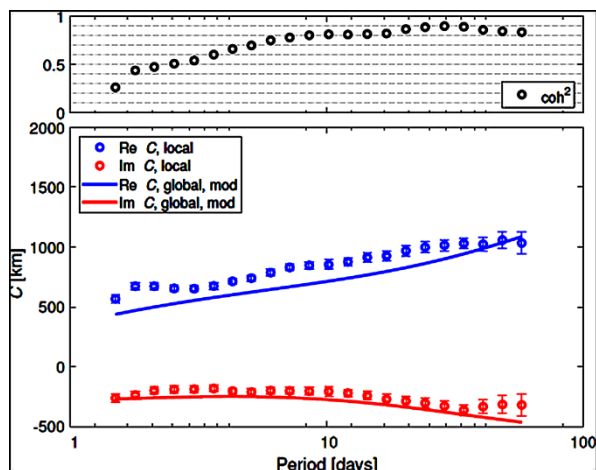
Ховд станцын урт хугацааны вариацийн өгөгдөл спектрийн анализ хийж гарган авсан С-респонсын үр дүнг Зураг 4-т үзүүлэв. Дээд панельд оролт болон гаралтын орны хоорондын когерент чанарын өөрчлөлтийг үеийн функц байдлаар харуулсан болно.

Когерент чанар нь 7 өдрөөс урт үеийн мужид 0.7–0.9 орчим утгад хүрч байгаа нь гадаад үүсгүүрийн орон болон индукцлэгдсэн дотоод орны хооронд тогтвортой хамаарал үүсэж байгааг илтгэнэ [15]. С-респонсын бодит байгуулагч нь үе өсөхийн хэрээр тогтвортой өсөх, харин хуурмаг байгуулагч нь сөрөг чиглэлд аажмаар өөрчлөгдөх ерөнхий хандлага үзүүлсэн

бөгөөд энэ нь синтетик загварчлалын үр дүнтэй нийцэж байв.

Доод талд Ховд станцын өгөгдлөөс үнэлсэн С-респонсын бодит байгуулагч (цэнхэр тэмдэглэгээ) болон хуурмаг байгуулагчийг (улаан тэмдэглэгээ) үзүүлэв. Мөн харгалзах глобал С-респонсын загварын утгуудыг шугаман муруйгаар харьцуулан дүрсэлсэн болно [18].

С-респонсын үнэлгээний тодорхой бус байдлыг холбогч функцийг статистик үнэлгээнд үндэслэн тооцож, бодит болон хуурмаг байгуулагчдын итгэлцлийн хязгаарыг Зураг 4-т error bar хэлбэрээр үзүүлэв. Зураг 4-өөс харахад error bar-ийн хэмжээ нь ихэнх үеийн мужид С-респонсын ерөнхий өөрчлөлтийн хандлагыг өөрчлөхүйц хэмжээнд хүрээгүй бөгөөд урт үеийн мужид бага зэрэг өсөх хандлагатай байна. Энэ нь урт хугацааны мужид ашиглагдах бие даасан спектрийн үнэлгээний тоо буурсантай холбоотой статистик тодорхой бус байдлыг илэрхийлж байгаа боловч, гарган авсан С-респонсын үндсэн хэлбэр, өөрчлөлтийн чиг хандлага тогтвортой хадгалагдаж байгааг харуулж байна.



Зураг 4. Зураг 4. Ховд геосоронзон станцын 2010–2022 оны өгөгдлөөс үнэлсэн С-респонс. Дээд панельд coherence^2 -ийн периодын хамаарлыг, доод панельд С-респонсын бодит байгуулагч $\text{Re}(C)$ (цэнхэр) болон хуурмаг байгуулагч $\text{Im}(C)$ (улаан)-ийн өөрчлөлтийг үзүүлэв. Хар шугам нь Olsen (1998)-ийн харьцуулалтын С-респонсын загварыг, error bar нь холбогч функцийг статистик үнэлгээнээс тооцсон тодорхой бус байдлыг тус тус илэрхийлнэ.

Ажиглагдсан болон синтетик С-респонсын ерөнхий хандлагын нийцэл нь ашигласан боловсруулалтын дараалал болон С-респонсын үнэлгээний үр дүн физикийн хувьд хүлээгдэж буй ерөнхий шинжийг хадгалж байгааг харуулж байна. Гэсэн хэдий ч нэг станцын өгөгдөл болон $n = 1$, $m = 0$ үүсгүүрийн ойролцооллыг ашигласан тул энэхүү нийцлийг бүс нутгийн гео-цахилгаан бүтцийн баталгаатай нотолгоо гэж үзэхгүй. Энэхүү судалгаанд ашигласан нэг станцын ажиглалтын өгөгдөл болон 1-D төлөөлөх загвар нь ГГТ-ийн аргачлалын хэрэгжилт болон С-респонсын үндсэн геофизикийн шинжийг үнэлэхэд хангалттай боловч бүс нутгийн гео-цахилгаан бүтцийн орон зайн өөрчлөлтийг бүрэн тодорхойлох үндэс болохгүй. Иймээс энэхүү үр дүн нь Ховд станцын орчмын гео-цахилгаан орчны урьдчилсан үнэлгээ бөгөөд цаашид олон станцын ажиглалт болон 2-D, 3-D инверсийн судалгаагаар баталгаажуулах шаардлагатай.

V. ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Ховд геосоронзон станцын 2010–2022 оны ажиглалтын өгөгдөлд С-респонсын стандарт үнэлгээний аргачлалыг хэрэгжүүлж, гарган авсан үр дүнг синтетик загварчлалын үр дүн болон өмнөх геосоронзон гүний тандалтын судалгаанд мэдээлэгдсэн ерөнхий хэв шинжтэй харьцуулан үнэлэв. Синтетик загвар болон бодит ажиглалтын үр дүнд ажиглагдсан ижил төстэй хандлага нь ашигласан өгөгдөл боловсруулах дараалал, спектрийн үнэлгээ болон холбогч функцийг тооцоолол нь урт хугацааны геосоронзон вариацийн нөхцөлд хэрэгжих боломжтойг харуулж байна.

7 өдрөөс урт периодын мужид coherence^2 -ийн утга ойролцоогоор 0.7–0.9 хүрсэн нь босоо болон хэвтээ соронзон байгуулагчдын хоорондын давтамжийн муж дахь харьцангуй өндөр шугаман хамаарлыг илэрхийлж, холбогч функцийг үнэлгээний статистик тогтвортой байдлыг дэмжиж байна. Үүний зэрэгцээ С-респонсын бодит байгуулагч период уртсахын хэрээр өсөх, харин хуурмаг байгуулагч аажмаар сөрөг чиглэлд өөрчлөгдөх ерөнхий хандлага ажиглагдсан бөгөөд энэ нь синтетик загварчлалаар тогтоосон респонсын өөрчлөлтийн хэв шинжтэй нийцэж байна. Ийм үр дүн нь бодит ажиглалтын өгөгдөлд хийсэн спектрийн болон холбогч функцийг боловсруулалт нь синтетик туршилтаар илэрсэн

физикийн үндсэн хамаарлыг тодорхой хэмжээнд хадгалж байгааг харуулна.

Уг хандлага нь өмнөх геосоронзон гүний тандалтын болон урт периодын магнитотеллурикийн судалгаанд тайлбарласан физикийн үндэслэлтэй нийцэж байна. Богино периодын мужид гадаргад ойр цахилгаан дамжуулах чадварын бүтэц С-респонсын хариунд илүү хүчтэй нөлөөлөх хандлагатай байдаг бол период уртсахын хэрээр цахилгаан соронзон орны нэвтрэлтийн гүн нэмэгдэж, илүү гүн орших цахилгаан дамжуулах чадварын бүтцийн нөлөө респонст тусах боломж нэмэгддэг. Jones (1983), Kuvshinov (2008), Kelbert нар (2009) нарын судалгаанд мөн урт периодын цахилгаан соронзон респонс нь литосфер–дээд мантийн цахилгаан бүтцийн өөрчлөлтийг судлахад ач холбогдолтой болохыг авч үзсэн байдаг. Иймээс С-респонсын периодын хамаарлыг тайлбарлахдаа зөвхөн респонсын далайцыг бус, бодит болон хуурмаг байгуулагчдын хамтын өөрчлөлт, мөн тухайн периодын муж дахь coherence-ийн утгыг хамтатган авч үзэх шаардлагатай.

Хойд Хятад, Өмнөд Сибирь болон Төв Азийн бүсэд хийгдсэн ГГТ болон урт периодын магнитотеллурикийн судалгаатай харьцуулахад дээрх физикийн ерөнхий хандлага нь ижил боловч судалгааны зорилго, өгөгдлийн бүтэц болон тайлбарлах түвшний хувьд ялгаатай байна. Эдгээр судалгаанд олон станцын өгөгдөл болон 2-D, 3-D цахилгаан дамжуулах чадварын инверсийн аргыг ашиглан литосфер–дээд мантийн бүтцийг нарийвчлан тайлбарласан байдаг бол энэ ажил нь нэг станцын ажиглалтын өгөгдөлд С-респонсын стандарт үнэлгээний аргачлалыг хэрэгжүүлэх боломж, тогтвортой байдлыг үнэлэхэд чиглэсэн. Иймээс энд хийсэн харьцуулалт нь тодорхой геологийн нэгж, дамжуулагч аномали эсвэл бүс нутгийн цахилгаан дамжуулах чадварын загварыг баталгаажуулах бус, харин гарган авсан респонсын ерөнхий хэв шинж болон ашигласан аргачлалын нийцлийг үнэлэхэд чиглэж байна.

Геосоронзон гүний тандалт болон магнитотеллурикийн аргууд нь хоёулаа байгалийн цахилгаан соронзон орны индукцийн үзэгдэлд тулгуурладаг боловч хэмжих физик хэмжигдэхүүн, ашиглах периодын муж, судалгааны орон зайн масштаб болон тайлбарлах аргачлалаараа ялгаатай.

Магнетотеллурикийн арга нь цахилгаан болон соронзон орны байгуулагчдыг хамтад нь хэмжиж, импеданс тензорыг тодорхойлон 2-D болон 3-D инверсийн аргаар газрын гүний цахилгаан дамжуулах чадварын бүтцийг өндөр орон зайн нарийвчлалтайгаар судлах боломж олгодог. Харин ГГТ нь геосоронзон орны урт хугацааны вариацид үндэслэн С-респонсыг үнэлдэг бөгөөд урт периодын цахилгаан соронзон орны индукцийн хариу нь тухайн периодод харгалзах нэвтрэлтийн гүн, гадаад үүсгүүрийн орны шинж, дохионы чанар болон газрын доорх цахилгаан дамжуулах чадварын тархалтаас хамааран илүү гүн хэсгийн бүтцэд мэдрэг байх боломжтой. Иймээс ГГТ-ийн мэдрэг байх гүний мужийг тогтмол утгаар тодорхойлох боломжгүй бөгөөд периодын муж болон цахилгаан дамжуулах чадварын орчны шинжээс хамаарна. Энэ утгаараа МТ болон ГГТ нь өөр өөр өгөгдөл, периодын муж, орон зайн масштаб болон гүний мэдрэг чанарыг ашигладаг боловч цахилгаан дамжуулах чадварын бүтцийг харилцан нөхөх байдлаар судлах боломжтой геофизикийн аргууд юм.

Судалгааны үр дүнг тайлбарлахад нэг станцын ажиглалтын өгөгдөл ашигласан болон урт хугацааны гадаад үүсгүүрийг эхний эрэмбийн зональ сфер гармоник ($n=1, m=0$)-аар төлөөлүүлсэн стандарт ойролцоолол нь үндсэн хязгаарлалт болж байна. Энэхүү ойролцоолол нь урт периодын вариацийн үед цагираг гүйдлийн том хэмжээний үүсгүүр давамгайлах нөхцөлд тохиромжтой боловч бодит геосоронзон оронд байж болох өндөр эрэмбийн сфер гармоник байгуулагчууд болон гадаад орны орон зайн жигд бус байдлыг тусад нь ялган үнэлэх боломжийг хязгаарладаг. Түүнчлэн нэг станцын С-респонсын үнэлгээгээр орон зайн 3-D цахилгаан дамжуулах чадварын бүтэц болон хэвтээ чиглэлийн өөрчлөлтийг тодорхойлох боломжгүй. Иймээс гарган авсан үр дүнг Баруун Монголын литосфер–дээд мантийн цахилгаан дамжуулах чадварын бүтцийн шууд инверсийн үр дүн, эсвэл тодорхой геологийн бүтцийн нотолгоо гэж үзэхгүй бөгөөд Ховд станцын өгөгдөлд С-респонсын стандарт үнэлгээ хийх арга зүйн үр дүнгийн түвшинд тайлбарлах нь зүйтэй.

Дээрх хязгаарлалтыг харгалзан үзвэл, судалгааны гол ач холбогдол нь Ховд геосоронзон станцын 2010–2022 оны урт

хугацааны ажиглалтын өгөгдөлд С-респонсын стандарт боловсруулалтын дарааллыг хэрэгжүүлж, уг өгөгдлийг урт периодын геосоронзон гүний тандалтын анализад ашиглах боломжийг бодит өгөгдлөөр харуулсанд оршино. Цаашдын судалгаанд Ховд, Улаанбаатар, Тосонцэнгэл, Алтай болон бусад геосоронзон станцуудын ажиглалтын өгөгдлийг хамтатган ашиглаж, гадаад үүсгүүрийн орны орон зайн бүтцийг нарийвчлан үнэлэх, өндөр эрэмбийн сфер гармоник байгуулагчуудын нөлөөг тооцох шаардлагатай. Үүний зэрэгцээ С-респонсын үр дүнг 2-D болон 3-D цахилгаан дамжуулах чадварын инверсийн загвар, мөн МТ зэрэг бусад геофизикийн мэдээлэлтэй нэгтгэн тайлбарласнаар Монгол орны литосфер–дээд мантийн цахилгаан бүтцийн талаар илүү найдвартай, олон масштабын үнэлгээ хийх боломж бүрдэх юм.

VI. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаанд геосоронзон гүний тандалтын стандарт боловсруулалтын дарааллыг Ховд геосоронзон станцын 2010–2022 оны ажиглалтын өгөгдөлд хэрэгжүүлж, синтетик загварчлал болон бодит ажиглалтын өгөгдөлд үндэслэн С-респонсын үнэлгээний боломжийг судлав. Судалгааны үндсэн үр дүнг дараах байдлаар нэгтгэн дүгнэж болно.

Нэгдүгээрт, онолын 1-D цахилгаан дамжуулах чадварын загваруудын үр дүнгээр С-респонс нь литосфер болон дээд мантийн цахилгаан дамжуулах чадварын өөрчлөлтөд мэдрэг болохыг харуулав. Өндөр дамжуулагч дээд мантийн загвар нь урт үеийн мужид илүү хүчтэй комплекс респонс үүсгэсэн бол өндөр эсэргүүцэлтэй литосферийн загвар нь харьцангуй бага далайцтай, тогтвортой респонс үзүүлсэн нь С-респонс гүний цахилгаан бүтцийн өөрчлөлтийг мэдрэх физик үндэслэлтэйг баталлаа.

Хоёрдугаарт, Ховд геосоронзон станцын 2010–2022 оны өгөгдөлд хийсэн боловсруулалтын үр дүнд 7 өдрөөс урт үеийн мужид $\text{coherence}^2 = 0.7$ – 0.9 орчим утгад хүрсэн нь босоо болон хэвтээ байгуулагчдын хооронд харьцангуй өндөр шугаман хамаарал байгааг харуулж, холбогч функцийн үнэлгээний найдвартай байдлыг дэмжиж байна. Гарган авсан С-респонсын ерөнхий хандлага нь синтетик загварын үр дүнтэй нийцэж, ашигласан боловсруулалтын

дараалал болон үнэлгээний аргачлал бодит геосоронзон ажиглалтын өгөгдөлд хэрхэрэгжүүлэх боломжтойг харууллаа.

Гуравдугаарт, геосоронзон өгөгдлийн чанарын хяналт, урьдчилсан боловсруулалт, спектрийн үнэлгээ, холбогч функцийн тооцоо болон бөмбөлөг гармоник томьёололд суурилсан С-респонсын үнэлгээг нэгтгэсэн дахин хэрэгжүүлэх боломжтой ажлын дарааллыг боловсруулсан. Энэхүү ажлын урсгал нь цаашдын олон станцын ГТТ анализын арга зүйн суурь болж өгнө.

Энэхүү судалгаа нь газрын гүний цахилгаан дамжуулах чадварын бүтцийг инверсийн аргаар сэргээн тодорхойлох зорилготой бус, харин Ховд геосоронзон станцын урт хугацааны ажиглалтын өгөгдөлд геосоронзон гүний тандалтын стандарт боловсруулалтын дарааллыг хэрэгжүүлж, С-респонсын үнэлгээний боломжийг бодит өгөгдөл дээр үнэлсэн арга зүйн судалгаа болно. Иймээс гарган авсан үр дүн нь Монгол орны хэмжээнд цаашид олон станцын ГТТ анализ, 2-D болон 3-D цахилгаан дамжуулах чадварын инверсийн судалгааг хөгжүүлэх суурь мэдээлэл болох ач холбогдолтой.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

1. Banks, R. J. (1969). Geomagnetic variations and the electrical conductivity of the upper mantle. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 17(5), 457–487. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1969.tb00252.x>
2. Schmucker, U. (1970). *Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States*. University of California Press.
3. Harris, F. J. (1978). On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 66(1), 51–83. <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.10837>
4. Wait, J. R. (1982). *Geo-electromagnetism*. Academic Press.
5. Parkinson, W. D. (1983). *Introduction to geomagnetism*. Scottish Academic Press.
6. Pedersen, J., & Hermance, J. F. (1986). Least-squares inversion of one-dimensional magnetotelluric data. *Geophysics*, 51(3), 674–690. <https://doi.org/10.1190/1.1442125>
7. Ward, S. H., & Hohmann, G. W. (1988). Electromagnetic theory for geophysical applications. In M. N. Nabighian (Ed.), *Electromagnetic methods in applied*

- geophysics* (Vol. 1, pp. 131–311). Society of Exploration Geophysicists.
8. Percival, D. B., & Walden, A. T. (1993). *Spectral analysis for physical applications: Multitaper and conventional univariate techniques*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511622762>
9. Jackson, J. D. (1999). *Classical electrodynamics* (3rd ed.). Wiley.
10. Simpson, F., & Bahr, K. (2005). *Practical magnetotellurics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614095>
11. Berdichevsky, M. N., & Dmitriev, V. I. (2008). *Models and methods of magnetotellurics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77814-1>
12. Kuvshinov, A. (2008). 3-D global induction in the oceans and solid Earth: Recent progress in modeling magnetic and electric fields from sources of magnetospheric, ionospheric and oceanic origin. In M. Kono (Ed.), *Treatise on geophysics* (Vol. 5, pp. 41–77). Elsevier.
13. Kelbert, A., Egbert, G. D., & Schultz, A. (2009). Electrical conductivity of the North American upper mantle. *Nature*, 460(7258), 1003–1006. <https://doi.org/10.1038/nature08259>
14. Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2010). *Discrete-time signal processing* (3rd ed.). Prentice Hall.
15. Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2011). *Random data: Analysis and measurement procedures* (4th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118032428>
16. Chave, A. D., & Jones, A. G. (2012). *The magnetotelluric method: Theory and practice*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139020138>
17. Kuvshinov, A., & Semenov, A. (2012). Global induction studies. In A. D. Chave & A. G. Jones (Eds.), *The magnetotelluric method: Theory and practice* (pp. 656–723). Cambridge University Press.
18. Olsen, N. (1998). The electrical conductivity of the mantle beneath Europe derived from C-responses from observatories. *Geophysical Journal International*, 133(2), 298–308. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00479.x>
19. Li, Y., Zhang, L., Jin, S., Zhou, L., & Zong, Q. (2025). A review on the magnetotelluric studies over the Central Asian Orogenic Belt—Recent developments and future aspects. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1526432. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1526432>
20. Rigaud, R., Comeau, M. J., Kuvshinov, A., Grayver, A., Batmagnai, E., Tserendug, S., et al. (2024). Regional magnetotellurics across Mongolia: Constraining lithospheric architecture from a new regional-scale 3-D electrical conductivity model. *Geophysical Journal International*. (Advance online publication).
21. Erdenechimeg, B., & Kuvshinov, A. (2025). Magnetotelluric studies in Mongolia: Progress status and outlook. *Mongolian Geoscientist*, 30(61), 33–52. <https://doi.org/10.5564/mgs.v30i61.3906>

ХАВСРАЛТ 1: С-РЕСПОНСЫН ГАРГАЛГАА

Бөмбөлөг гармоник $m = 0$ үүсгүүрийн хувьд гадаад болон дотоод эх үүсвэрийн соронзон скаляр потенциалуудыг салгасан хэлбэр нь дараах байдалтай байна:

$$V^{ext} = a \left(\frac{r}{a} \right) \epsilon_1(\omega) P_1(\cos\theta) \quad (A.1)$$

$$V^{int} = a \left(\frac{a}{r} \right)^2 l_1(\omega) P_1(\cos\theta) \quad (A.2)$$

Энд V^{ext} болон V^{int} нь харгалзан гадаад (үүсгүүрийн) болон дотоод (индукцлэгдсэн) соронзон скаляр потенциалуудыг, а нь Дэлхийн дундаж радиус, r нь радиаль координатыг, ϵ_1 болон l_1 нь харгалзан гадаад болон дотоод орны бөмбөлөг гармоник коэффициентүүдийг илэрхийлнэ. Мөн $P_1(\cos\theta)$ нь I зэргийн Лежандрын олон гишүүнт бөгөөд $P_1(\cos\theta) = \cos\theta$ болно. Соронзон орны байгуулагчдыг соронзон скаляр потенциалын градиентаар тодорхойлох бөгөөд дараах хамаарлыг ашиглана:

$$\mathbf{B}(r, \theta, \phi) = -\nabla V \quad (A.3)$$

Бөмбөлөг координатын системд градиент операторыг задлавал радиаль болон ко-өргөргийн байгуулагчдыг дараах байдлаар илэрхийлж болно:

$$B_r = -\frac{\partial V}{\partial r} \quad (A.4)$$

$$B_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \quad (A.5)$$

Дэлхийн гадаргууа ($r = a$) дээр А.1 тэгшитгэлийг А.4 болон А.5 -д орлуулснаар гадаад орны радиаль болон ко-өргөргийн байгуулагчдыг дараах байдлаар гарган авна.:

$$B_r^{ext} = -\frac{\partial}{\partial r} \left[a \left(\frac{r}{a} \right) \epsilon_1 \cos\theta \right] = -\epsilon_1 \cos\theta \quad (A.6)$$

$$B_\theta^{ext} = -\frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[a \left(\frac{r}{a} \right) \epsilon_1 \cos\theta \right] \quad (A.7)$$

зэргийн Лежандрын олон гишүүнтийн уламжлалын стандарт хамаарлыг ашиглавал дараах илэрхийлэл гарна:

$$\frac{d}{d\theta} \cos\theta = -\sin\theta$$

Дараах илэрхийллийг гарган авна

$$B_\theta^{ext} = \epsilon_1 \sin\theta \quad (A.8)$$

Үүнтэй адил аргаар А.2 тэгшитгэлээс дотоод соронзон скаляр потенциалыг радиаль координатаар уламжилбал дотоод орны радиаль байгуулагч дараах байдлаар гарна.:

$$B_r^{int} = -\frac{\partial V^{int}}{\partial r} = -\epsilon_1 \cos\theta - 2l_1 \cos\theta \quad (A.9)$$

С-респонсын тодорхойлолтын дагуу дотоод орны радиаль байгуулагчийг гадаад орны хэвтээ байгуулагчид харьцуулбал дараах илэрхийлэл гарна:

$$\frac{B_r^{int}}{B_\theta^{ext}} = \frac{-\epsilon_1 \cos\theta - 2l_1 \cos\theta}{\epsilon_1 \sin\theta} = -\cot\theta \frac{2l_1}{\epsilon_1} \quad (A.10)$$

Үндсэн текстийн Тэгш. (7)-д өгсөн С-респонсын тодорхойлолтыг ашиглан дотоод болон гадаа бөмбөлөг гармоник коэффициентүүдийн харьцааг дараах байдлаар бичиж болно:

$$\frac{l_1}{\epsilon_1} = \frac{C}{a} \quad (A.11)$$

А.11-д гарсан коэффициентүүдийн харьцааг А.10-д орлуулснаар дараах илэрхийлэл гарна:

$$\frac{B_r^{int}}{B_\theta^{ext}} = -\cot\theta 2 \frac{C}{a} \quad (A.12)$$

Илэрхийллийг алгебрын хувьд хялбарчилсны үр дүнд С-респонсын эцсийн томъёоллыг дараах байдлаар гарган авна:

$$C = -\frac{a}{2} \tan\theta \frac{B_r^{int}}{B_\theta^{ext}} \quad (A.13)$$

Enkhzul Bayartogtokh^{a*}, Batmagnai Erdenechimeg^a

a – Department of Geomagnetic, Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences

ABSTRACT

Geomagnetic depth sounding (GDS) is an electromagnetic induction method that uses long-period natural variations of the geomagnetic field to investigate the electrical conductivity structure of the lithosphere and upper mantle. In Mongolia, the use of geomagnetic observatory data for deep electromagnetic induction studies remains limited. This study applies the standard GDS methodology to long-term geomagnetic observations from the Hovd geomagnetic station and evaluates the feasibility of estimating the C-response from Mongolian geomagnetic data. To validate the methodological implementation, several representative 1-D synthetic electrical conductivity models of the lithosphere and upper mantle were tested. These models were designed to examine how different geo-electrical conditions, including a shallow conductive layer, a resistive lithosphere, and a conductive upper mantle, affect the real and imaginary components of the C-response. Continuous H, D, and Z geomagnetic field components recorded at the Hovd station during 2010–2022 were processed using standard procedures, including time synchronization, quality control, trend removal, filtering, resampling, and spectral analysis. Frequency-domain transfer functions and complex C-responses were then estimated from the processed data. The results show that, for periods longer than 7 days, the squared coherence reaches 0.7–0.9, indicating stable transfer-function estimates. The real and imaginary components of the observed C-response show a physically consistent trend that agrees with the general behavior predicted by the synthetic models. This study provides an initial methodological assessment of C-response estimation using long-term geomagnetic observations from the Hovd station. Because no electrical conductivity inversion was performed, the obtained C-responses are not directly interpreted in terms of specific geological structures or conductive anomalies. Instead, the results demonstrate the feasibility of applying standard GDS processing to Mongolian geomagnetic data and provide a methodological basis for future multi-station GDS studies and 2-D or 3-D electrical conductivity inversion in Mongolia.

Keywords: C-response, Electrical conductivity, Geomagnetic variations, Transfer functions, Spectral analysis, Khovd observatory.