

Нар дэлхийн харилцан үйлчлэл ба бүс нутгийн соронзон шуурганы өөрчлөлтийн судалгаа

Ж.Мөнхзул^{1*}, Б.Амаржаргал¹

¹ШУА, Одон Орон Геофизикийн Хүрээлэн

ORCID:0009-0003-0950-4360

Хураангуй: Энэ судалгааны ажлаар 1995-2026 оны хооронд Монгол орны нутаг дэвсгэрт бүртгэгдсэн соронзон шуурганы урт хугацааны каталогийг шинээр бүрдүүлж, 2020 оны 12 дугаар сарын 5-6-нд ажиглагдсан хүчтэй соронзон шуургыг онцлон судаллаа. Судалгааны ажилд сансрын цаг агаарын нөлөө нар дэлхийн харилцан үйлчлэлийн нөлөөг тооцоолохын тулд хиймэл дагуулуудын өгөгдөл, бүс нутгийн соронзон оргилуудын өгөгдөл INTERMAGNET, MAGDAS зэрэг сүлжээ станцуудын соронзон орны хэвтээ (H) байгуулагчийн өгөгдлүүдээр гариг хоорондын орчин болон дэлхийн соронзон орны орон зай, цаг хугацааны өөрчлөлтийн харьцуулсан анализ хийв. Судалгааны үр дүнгээс харахад Улаанбаатар соронзон оргилд бүртгэгдсэн 356 соронзон шуурганы давтамж, соронзон шуурганы идэвхжил нь нарны идэвхжлийн 11 жилийн циклийн үетэй корреляцитай байв. Нарны циклийн 25-р циклийн хамгийн эхэнд ажиглагдсан нарны идэвхжил бага үеийн маш өндөр импульстэй соронзон шуургыг сонгон авч анализ хийлээ. Соронзон шуурга эхлэх үеийн физик үзэгдэл нь нарнаас шидэгдсэн титмийн масс шидэгдэлтийн улмаас нарны салхины динамик даралт огцом өссөний улмаас дэлхийн соронзон зааг хэвийн байрлалаас дэлхийн чиглэлд шилжин $7.4R_E$ хүртэл хүчтэй шахагдаж, дэлхийд ажиглагдсан соронзон оронд огцом импульс (SI) үүсгэсэн байна. Гариг хоорондын соронзон орны (ГХСО) Bz байгуулагчийн сөрөг чиглэл нь дэлхийн соронзон орны хүчний шугам дахин нэгдэх (magnetic reconnection) процесс үүсгэсэн тул соронзон мандалд энерги дамжих үндсэн нөхцөл болсныг тогтоов. Нарны салхины импульс соронзон заагаас дэлхийн гадаргуу хүртэл ойролцоогоор 57 минутын хугацааны хоцрогдолтой дамжсан бөгөөд бүс нутгийн станцуудын магнитограмм дахь H байгуулагчийн огцом бууралт нь дэлхий орчмын хиймэл дагуулын хэмжилтүүдтэй физик механизмын хувьд маш сайн тохирч байна.

Түлхүүр үг: Соронзон шуурга, соронзон мандал, титмийн масс шидэгдэлт (CME), нарны салхи, соронзон орны хүчний шугам дахин нэгдэх.

PACS number: [94.30.Vf]

1. Оршил

Сүүлийн жилүүдэд нарны идэвхжил болон сансрын цаг уурын үзэгдлүүд нь дэлхийн орчмын орон зай, гариг хоорондын орчин, технологийн дэд бүтэц, холбоо навигацийн системд үзүүлэх нөлөөллөөрөө олон улсын түвшинд эрчимтэй судлагдах болсон [1]. Нарнаас ялгарч буй плазмын урсгал, соронзон орон бүхий плазм, титмийн масс шидэгдэх үзэгдэл (*Coronal Mass Ejection, CME*), асар өндөр энергитэй бөөмсийн урсгал зэрэг нь дэлхийн соронзон мандалтай харилцан үйлчилж, дэлхий дээр соронзон шуурга,

туйлын туяа, цэнэгт мандлын доголдол зэрэг олон төрлийн үзэгдлийг үүсгэдэг [2].

Сансрын цаг уурын огцом өөрчлөлтүүд нь зөвхөн онолын шинжлэх ухааны ач холбогдолтой бус, орчин үеийн өндөр технологийн системүүдэд шууд эрсдэл учруулдаг. Соронзон шуурганы үед хиймэл дагуулын ажиллагаа доголдох, GPS/GNSS навигацийн алдаа өсөх, богино долгионы радио холбоо саатах, өндөр хүчдэлийн цахилгаан дамжуулах шугамд соронзон индукцийн гүйдэл (*Geomagnetically Induced Currents, GIC*) бий болж трансформаторуудыг гэмтээх зэрэг сөрөг үр дагаврууд ажиглагддаг [3] [4]. Иймээс нар - дэлхийн харилцан үйлчлэлийн механизм,

* munkhzul@iag.ac.mn

соронзон мандлын хариу урвалыг судлах нь гариг хоорондын орчны аюулгүй байдлыг хангах, сансрын цаг уурын урьдчилсан мэдээний нарийвчлалыг сайжруулахад чухал ач холбогдолтой юм.

Судалгааны үндсэн зорилго нь:

- 1995-2026 оны хооронд Монгол орны нутаг дэвсгэрт бүртгэгдсэн соронзон шуурганы урт хугацааны нэгдсэн каталогийг бүрдүүлж, нарны идэвхжилтэй (Sunspot Number, SSN) харилцан хамаарлыг тогтоох
- Огцом импульс бүхий эхлэлтэй 2020 оны 12-р сарын 05–06-ны өдрүүдэд ажиглагдсан хүчтэй соронзон шуурганы нар–дэлхийн харилцан үйлчлэлийн физик механизмыг тайлбарлах, соронзон заагийн шахалт, соронзон орны хүчний шугам дахин нэгдэх (magnetic reconnection) процесс болон нарны салхины импульсийн дамжих хоцрогдлыг олон эх сурвалжийн өгөгдлийн харьцуулсан анализаар тодорхойлох явдал юм.

Эдгээр асуудлыг шийдвэрлэснээр бүс нутгийн сансрын цаг уурын судалгааны суурь мэдээллийн санг баяжуулахын зэрэгцээ сансрын цаг уурын урьдчилсан мэдээний загварчлалд шаардлагатай параметруудийг нарийвчлан тодорхойлоход хувь нэмэр оруулна.

2. Судлагдсан байдал

Нар—Дэлхийн харилцан үйлчлэл болон соронзон мандлын динамик үзэгдэлд суурилсан шинжлэх ухааны ойлголтууд XIX зууны дунд үеэс туршилт, ажиглалтын хэлбэрээр судлагдаж эхэлсэн түүхтэй. 1859 оны 9-р сарын 01-нд Их Британийн одон орон судлаач Ричард Кэррингтон наран дээр хүчтэй тэсрэлт (solar flare) болохыг анх удаа ажигласан. Энэ үзэгдлээс хойш ойролцоогоор 17 цагийн дараа дэлхий даяар маш хүчтэй соронзон шуурга, туйлын туяаны үзэгдэл ажиглагдсан байна [5]. Тухайн үеийн мэдээлэл холбооны гол хэрэгсэл болох телеграфын системүүд соронзон индукцийн гүйдлийн улмаас шатаж, ажиллагаагүй болсон нь сансрын цаг уур дэлхийн технологийн дэд бүтцэд

шууд нөлөөлөх чадвартайг харуулсан анхны түүхэн нотолгоо юм.

XX зууны эхээр Сидней Чепмен (Sydney Chapman) болон Винченцо Ферраро (Vincenzo Ferraro) нар нарнаас үе үе шидэгдэх цэнэгт бөөмсийн урсгал дэлхийн соронзон орныг мөргөх үед үүсэх физик механизмын онолыг боловсруулсан [5]. Энэ онолоор, нарны салхины плазмын урсгалын динамик даралт нь дэлхийн соронзон мандлын гадна хил буюу соронзон заагийг (magnetopause) хүчтэй шахаж, дэлхий дээр соронзон орны хэвтээ байгуулагчийн- Н(нТл) эрчмийг огцом өсгөдөг. Энэ үзэгдлийг соронзон шуурганы огцом эхлэл (Sudden Storm Commencement, SSC) буюу Огцом Импульс (Sudden Impulse, SI) гэж нэрлэх болсон. Ингэснээр нарны салхи дэлхийн соронзон оронтой харилцан үйлчлэлцэж соронзон заагийн орчимд Дэлхийн соронзон орныг зүүнээс баруун тийш чиглэн гүйх Chapman-Ferraro гүйдлийн систем үүсдэг байна [2].

1958 онд Южин Паркер нарнаас тасралтгүй урсах өндөр хурдтай плазмын урсгал буюу "Нарны салхи" гариг хоорондын орон зайд гидродинамик хуулиар тархдаг болохыг математик аргаар баталж, нарны соронзон орны хүчний шугамууд гариг хоорондын орчинд зөөгдөн, гариг хоорондын соронзон орон (ГХСО, Interplanetary Magnetic Field, IMF)-ыг бүрдүүлдэг болохыг тогтоосон юм. Өөрөөр хэлбэл гариг хоорондын хөндий хоосон орон зайг ГХСО гэнэ. Сансрын эрин үе эхэлж хиймэл дагуулуудын хэмжилтийн үр дүнд, гариг хоорондын соронзон орны (ГХСО) чиглэл нь соронзон шуурга үүсэхэд гол үүрэгтэй болохыг эрдэмтэд нээсэн байдаг [7].

1961 онд Жеймс Данжи (James Dungey) сансрын плазмын физикт хувьсгал хийж "Соронзон орны хүчний шугам дахин нэгдэх" (Magnetic Reconnection) онолыг дэвшүүлсэн байдаг [6]. Данжийн загвараар, ГХСО-ийн өмнө зүг чиглэсэн B_z байгуулагч ($B_z < 0$, Geocentric Solar Ecliptic, GSE) нь дэлхийн хойд зүг рүү чиглэсэн соронзон орны хүчний шугамтай дэлхийн соронзон орны наран гийсэн талд мөргөлдөх үед тэдгээр хүчний шугамууд тасарч, харилцан дахин холбогддог. Энэ соронзон орны хүчний шугам дахин нэгдэх процесс нь нарны салхины асар их энерги, плазмыг дэлхийн соронзон мандал руу шууд нэвтрүүлэх "нээлттэй хаалга" болж өгдөг юм [4].

Соронзон мандалд нэвтэрсэн плазмын урсгал соронзон мандлын сүүл (magnetotail) хэсэгт энерги болон хуримтлагдаж, улмаар дэлхий рүү чиглэсэн плазмын урсгалыг (injection) үүсгэдэг. Эдгээр цэнэгт бөөмс дэлхийг тойрон экватор орчмын орон зайд ($3-6R_E$ зайд) Лоренцын хүчний нөлөөгөөр зүүнээс баруун тийш чиглэсэн асар том гүйдлийн системийг үүсгэх ба үүнийг цагираг гүйдэл (Ring Current, RC) гэнэ [8]. Соронзон шуургыг үүсэх, ажиглагдах, буцаж замхрах байдлаар гурван үе шатанд хуваадаг. Соронзон шуурганы гол үе шатанд (main phase) цагираг гүйдэл эрчимжиж, улмаар энэ гүйдлийн үүсгэсэн соронзон орон нь Дэлхийн өөрийнх нь соронзон орны эсрэг чиглэдэг тул дэлхийн гадаргуу дээр, өргөргөөс хамааран, дундаж болон доод өргөрөгт соронзон орны хэвтээ байгуулагчийн утга (H) маш хүчтэй багасах үндсэн шалтгаан болдог [9]. Энэ хэвтээ байгуулагчийн уналтын - H(нТл), Geomagnetic coordinate system, (GSM) хэмжээг соронзон идэвхжил - Dst (Disturbance Storm Time) буюу SYM/H (minute) индексээр хэмждэг [8].

Орчин үеийн сансрын цаг уурын судалгаанд ACE, WIND, DSCOVR зэрэг Нар-Дэлхийн хоорондын Лагранжийн L1 цэг дээр байрлах хиймэл дагуулуудын өгөгдлийг ашиглан соронзон шуургыг үүсгэж байгаа титмийн масс шидэгдэлт (CME) болон нарны салхины эрчимт мужаас үүсэх соронзон урсгалын (Corotating Interaction Regions, CIR) динамикийг нарийвчлан судалж байна [10]. Түүнчлэн, олон улсын соронзон оргилуудын INTERMAGNET болон MAGDAS зэрэг дэлхий даяарх болон бүс нутгийн сүлжээнүүд нь сансар дахь хиймэл дагуулын өгөгдлийг газар дээрх соронзон орны хувьслын физик үзэгдэлтэй уялдуулан, соронзон мандлын дотоод болон гадаад эх үүсвэрт гүйдлийн системийг загварчлахад гол үүрэг гүйцэтгэж байна [11].

3. Судалгааны арга зүй

Энэхүү судалгаагаар Нар—Дэлхийн харилцан үйлчлэлийн механизмыг физик үндэслэлтэй тайлбарлахын тулд олон эх сурвалжийн өгөгдлүүдийг нэгтгэн урт хугацааны соронзон шуурганы ангилал хийх мөн зарим нэг хүчтэй соронзон шуурганы үед соронзон мандлын өөрчлөлтийг хугацааны богино завсарт орон зайн өөрчлөлтөөр тооцоолох судалгааг хийлээ. Судалгаанд хиймэл дагуулын байрлал болон соронзон заагийн геометрийг тодорхойлоход

Geocentric Solar Ecliptic (GSE) координатын системийг ашигласан. Энэ системд соронзон орны байгуулагчийн X тэнхлэг нарны чиглэлд авсан. Өөрөөр хэлбэл нараа дагаж эргэх хөдөлгөөн хийнэ. Z тэнхлэг эклиптийн хойд туйлд чиглэнэ. Гариг хоорондын соронзон орны B_z байгуулагчийн “өмнөд чиглэл” ($B_z < 0$) ба “хойд чиглэл” ($B_z > 0$) гэсэн ойлголтууд нь GSM (Geocentric Solar Magnetospheric) координатын системд тодорхойлогддог. Соронзон оргилуудын соронзон орны байгуулагчийн хойд зүг соронзон хойд туйлыг чиглэх ба хувьслыг (GMS, North-East-Down) системд үндэслэсэн HDZ байгуулагчдыг ашигласан. Нарны салхины динамик даралт (P_{sw}) нь дараах гидродинамик хамаарлаар тодорхойлогддог:

$$P_{sw} = nmV^2 \quad (1)$$

Энд: n — плазмын нягт, m — бөөмийн масс, V_{sw} — нарны салхины хурд болно. ГХСО-ийн B_z байгуулагч өмнө чиглэлтэй үед дэлхийн соронзон оронтой дахин нэгдэх үзэгдэл үүсэж, нарны салхины энерги соронзон мандал руу нэвтрэх боломж бүрддэг [6] [11].

3.1. Мэдээлэл боловсруулалт ба өгөгдөл: Хиймэл дагуулын өгөгдөл

Гариг хоорондын соронзон орны B_z байгуулагч, нарны салхины хурд (V_{sw}), плазмын нягт (n), динамик даралт (P_{sw})-ын 1 минутын нарийвчлалтай өгөгдлийг ашиглалаа.

Олон улсын соронзон оргилуудын өгөгдөл: Бүс нутгийн соронзон орны хувьслыг тодорхойлохын тулд Япон улсын MAGDAS сүлжээний Ховд (HVD) станцын өгөгдлийн сан, Улаанбаатар соронзон оргилын мэдээллийн сан (ULN) болон олон улсын соронзон оргилуудын сүлжээ болох INTERMAGNET-ийн Honolulu (HON), Hermanus (HER) станцуудын соронзон орны хэвтээ байгуулагчийн өөрчлөлт (H), соронзон хазайлтын (D), болон босоо байгуулагчийн (Z) өөрчлөлтийг 1 минутын нарийвчлалтайгаар авч боловсруулалтын MATLAB, Python программаар өгөгдлийг боловсруулав.

3.2. Өгөгдөл боловсруулах аргачлал

1995–2026 оны соронзон шуургыг каталогжуулахдаа Улаанбаатар соронзон оргилд

бүртгэгдсэн соронзон орны өөрчлөлт (HDZ), цагираг гүйдлийн (ring current) эрчмийг Dst (Disturbance Storm Time) болон SYM-H индексийн утгыг үндсэн шалгуур болгосон. Соронзон шуургыг шуурга явагдах байдлаар нь 3 үе шатанд хуваадаг. Үүнд: шуурга эхлэх үе шат (Initial phase), гол үе шат (Main phase) болон сэргэлтийн үе шат (Recovery phase) гэж ангилдаг. Соронзон шуурганы идэвхжил хамгийн бага утгандаа хүрэх үед соронзон шуурганы хамгийн хүчтэй үедээ хүрэх тул (storm peak) Dst индексийн хамгийн бага утгаас хамааруулан соронзон шуургыг хэд хэд ангилдаг. Өөрөөр хэлбэл соронзон идэвхжил хэдий чинээ бага байна соронзон шуурга төдий чинээ хүчтэй байна.

Хүснэгт 1 Соронзон шуурганы ангилал

	Шуурганы ангилал	D_{st} -соронзон идэвхжил (нТл)
1	Бага	$-50 < D_{st}$
2	Дунд	$-100 < D_{st} < -50$
3	Хүчтэй	$-200 < D_{st} < -100$
4	Ширүүн	$-350 < D_{st} < -200$
5	Асар хүчтэй	$D_{st} < -350$

Соронзон орны хэвтээ байгуулагч –Н өгөгдлийг цаг хугацааны дарааллын дагуу стандартчилан боловсруулж, тухайн сарын тайван 5 хоногийн дунджийг олж тооцоолон, энэ дундаас тухайн шуургатай хоногийн хувьслыг цаг, мин, секунд бүрийн утгыг харгалзуулан хасаж, хэлбэлзлийг арилгах зорилгоор хоногийн дундаж утгаар нормчилсон. Шуурганы үеийн хазайлтыг ΔH дараах (2) томъёогоор тодорхойлов.

$$\Delta H = H_t - H_q \quad (2)$$

H_t — тухайн өдрийн хэмжилт

H_q — соронзон орны тайван хоногийн дундаж утга

Соронзон шуурганы үе шат, сэргэлтийн үе шат болон огцом эхлэл (Sudden Impulse, SI)-ийг тодорхойлохдоо хугацааны уламжлалын арга ашиглалаа.

3.3. Соронзон заагийн шахалтын аналитик тооцоолол

Нарны салхины динамик даралтын өсөлт болон ГХСО-ны байгуулагчийн нөлөөгөөр соронзон мандлын хамгийн гадна давхарга соронзон заагийн нарны алслах цэгийн зай r_0 хэрхэн шахагдах тухай арга зүйг аналитик загвараар дараах (3) байдлаар тооцоолно [10].

$$r_0 = \begin{cases} (10.22 + 1.29 * B_z) P_{sw}^{\frac{1}{6.6}}, & B_z \geq 0 \\ (10.22 + 0.25 * B_z) P_{sw}^{\frac{1}{6.6}}, & B_z < 0 \end{cases} \quad (3)$$

r_0 — дэлхийн радиусаар илэрхийлэгдэх ($R_e = 6400\text{км}$) алслалт. Соронзон заагийн хэлбэрийг илэрхийлэгч тэлэлтийн коэффициентийг тооцоолон олбол:

$$\alpha = \begin{cases} (0.58 + 0.010 * R_e) P_{sw}^{0.005}, & B_z \geq 0 \\ (0.58 + 0.070 * R_e) P_{sw}^{0.005}, & B_z < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Орон зайн туйлширсан загварыг дараах (5)

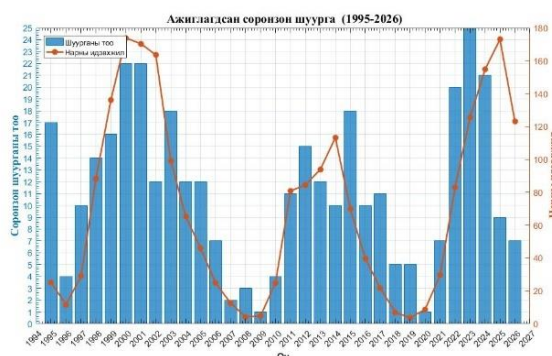
$$r = r_0 \left(\frac{2}{1 + \cos \theta} \right)^\alpha \quad (5)$$

хамаарлаар MATLAB программ дээр код бичиж, ердийн болон соронзон шуурга явагдах үеийн соронзон заагийн геометрийн байрлалыг загварчилсан болно.

4. Судалгааны ажлын үр дүн

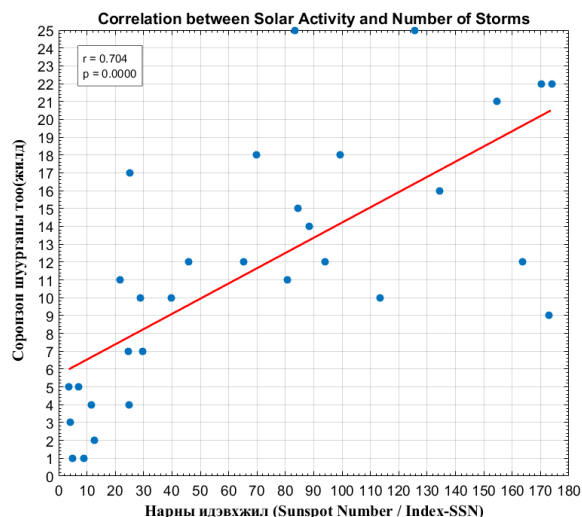
4.1. 1995-2026 онуудад Монгол оронд ажиглагдсан мэдээллийн сан ба каталог

Судалгааны ажлаар 1995-2026 оны олон жилийн ажиглалтын материалд үндэслэн Монгол орны нутаг дэвсгэрт бүртгэгдсэн нийт 356 соронзон шуурганы өгөгдлийг нэгтгэн боловсруулж, урт хугацааны нэгдсэн каталогийг шинээр бүрдүүлэв
Зураг 1.



Зураг 1. 1995-2026 онуудад Монгол улсад ажиглагдсан 356 соронзон шуурганы мэдээллийн сан ба каталог

Каталогийн статистик боловсруулалтаас харахад соронзон оргилд тухайн жилд бүртгэгдсэн шуурганы тоо нь нарны идэвхжил буюу нарны толбоны тооноос (SSN) хамааралтай бөгөөд 11 жилийн мөчлөгт идэвхжилтэй өндөр корреляцитай байна.



Зураг 2. Нарны идэвхжил ба соронзон шуурганы тооны хамаарал

Нарны толбоны тоо болон жилд ажиглагдаж соронзон шуурганы давтамжийн шууд хамаарлыг үзэхэд корреляцийн коэффициент $r=0.704$ байгаа нь дэлхийд ажиглагдах соронзон шуурга нарны идэвхжилээс өндөр хамааралтай байна

Хүснэгт 2. 1995-2026 онуудад Монгол улсад ажиглагдсан соронзон шуурганы тоо ба нарны идэвхжил (нарны толбоны тоо-SSN)

	Он	Шуурганы тоо	Он	Нарны толбоны тоо (SSN)
1	1995	17	1995	25.1
2	1996	4	1996	11.6
3	1997	10	1997	28.9
4	1998	14	1998	88.3
5	1999	16	1999	136.3
6	2000	22	2000	173.9
7	2001	22	2001	170.4
8	2002	12	2002	163.6
9	2003	18	2003	99.3
10	2004	12	2004	65.3
11	2005	12	2005	45.8
12	2006	7	2006	24.7
13	2007	2	2007	12.6
14	2008	3	2008	4.2
15	2009	1	2009	4.8
16	2010	4	2010	24.9
17	2011	11	2011	80.8
18	2012	15	2012	84.5
19	2013	12	2013	94
20	2014	10	2014	113.3
21	2015	18	2015	69.8
22	2016	10	2016	39.8
23	2017	11	2017	21.7
24	2018	5	2018	7
25	2019	5	2019	3.6
26	2020	1	2020	8.8
27	2021	7	2021	29.6
28	2022	20	2022	83
29	2023	25	2023	125.5
30	2024	21	2024	154.7
31	2025	9	2025	173
32	2026	7	2026	123

4.2. 2020 оны 12-р сарын 05-ны хүчтэй соронзон шуурганы судалгаа

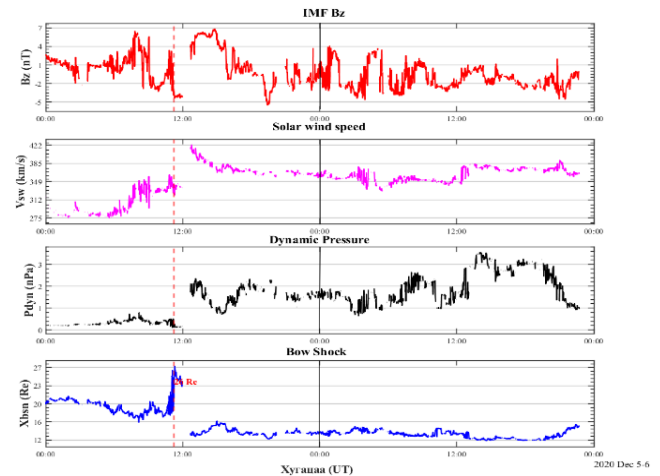
2020 оны 12-р сарын 5–6-ны соронзон шуургыг онцлон судлах болсон шалтгаан нь дараах онцлог шинжтүүдтэй холбоотой юм. Нэгдүгээрт, энэ шуурга нь нарны циклийн 24-р үе нарны идэвхжил хамгийн бага (2019–2020) үеийн дараагийн, 25-р цикл эхлэх үеийн шилжилтийн үед болсон учраас нарны идэвхжил бага байхад ч наран дээр тэсрэлт явагдаж хүчтэй CME үүсэн, соронзон шуурга ажиглагдаж болохыг харуулсан нэг ховор тохиолдол юм. Хоёрдугаарт, соронзон идэвхжил бага Dst индекс -40 нТл-аас доош буурч, дунд зэргийн хүчтэй шуурганы онцлогийг илэрхийлсэн нь Монгол орны бүс нутгийн соронзон оргилуудад тод бүртгэгдсэн физик үзэгдэл болсон. Гуравдугаарт, энэ үзэгдлийн үед Cluster хиймэл дагуулын өгөгдөл нь соронзон заагийн шахалтыг орон зайд шууд хэмжих боломж олгосон тул олон эх сурвалжийн харьцуулсан анализ хийхэд бүрэн тохиромжтой байлаа.

2020 оны 12 дугаар сарын 5–6-ны өдрүүдэд дэлхийн соронзон мандалд мэдэгдэхүйц өөрчлөлт ажиглагдсан бөгөөд энэ нь Наран дээр болсон титмийн масс шидэгдэлт (СМЕ)-тэй холбоотой байв. Уг үзэгдлийн үед нарны салхины хурд, нягт огцом нэмэгдэж, Гариг хоорондын соронзон орны (ГХСО) B_z байгуулагч өмнөд чиглэлтэй болсон нь дэлхийн соронзон мандал руу энерги дамжих үндсэн нөхцөлийг бүрдүүлсэн. Үүний үр дүнд соронзон зааг (*magnetopause*) болон цохих долгионы фронт (*bow shock*) хүчтэй шахагдаж, газар дээрх соронзон оргилуудын магнитограммд соронзон орны огцом импульс (*Sudden Impulse, SI*) бүртгэгдсэн байна [13].

Судалгааны хүрээнд 2020 оны 12 дугаар сарын 05-нд ажиглагдсан хүчтэй соронзон шуургыг онцлон авч үзэж, соронзон шуурганы үе шатууд, дэлхийн соронзон орны өөрчлөлт, соронзон идэвхжил (*Dst*) огцом өөрчлөлт болон бүс нутгийн соронзон орны динамикт үзүүлсэн нөлөөллийг нарийвчлан судаллаа. Энэхүү соронзон шуурганы үеийн төлөв байдлыг OMNI, Cluster, INTERMAGNET, MAGDAS станцын өгөгдлөөр судаллаа.

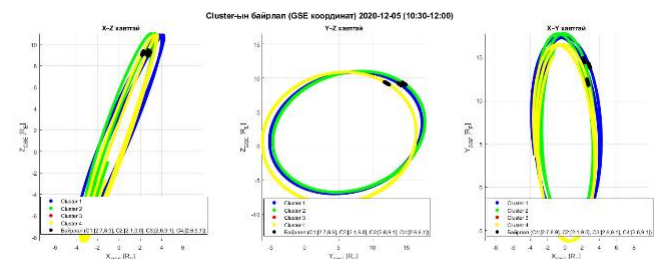
Нарны салхи ба ГХСО-ийн өөрчлөлт (OMNI хиймэл дагуулын өгөгдөл): 2020 оны 12-р сарын 5-нд нарны салхины хурд ойролцоогоор 450-500 км/с хүрч нэмэгдсэн. Үүнтэй зэрэгцэн ГХСО-ийн B_z байгуулагч сөрөг утгатай болж ($B_z < 0$), дэлхийн соронзон мандал руу энерги дамжих нөхцөл бүрдсэн. Энэ үед соронзон орны хүчний шугам дахин нэгдэж (*magnetic reconnection*) соронзон мандал руу нэвтрэх нарны салхины плазмын урсгал нэмэгдсэнээр цагираг гүйдэл (*ring current*) болон туйлын туяаны гүйдэл (*auroral electrojet*) идэвхжсэн байна. *SYM/H* индекс +5 нТл-аас -20 нТл хүртэл өссөн нь соронзон заагийн шахалт болон Chapman-Ferraro гүйдлийн өсөлтийг илэрхийлж байна.

Зураг 3-оос харахад 2020 оны 12-р сарын 5-ны 11:06 UT орчимд нарнаас шидэгдсэн СМЕ-ийн фронт OMNI хиймэл дагуулын байрлалд хүрмэгц гариг хоорондын соронзон орны B_z байгуулагч өмнөд зүг рүү огцом эргэж (туйлширч) -4.5 нТл хүрсэн байна. Үүнтэй зэрэгцэн нарны салхины хурд (V_{sw}) 320 км/с-ээс 420 км/с хүртэл, динамик даралт (P_{dyn}) 0.5 нПа-аас 2.3 нПа хүртэл огцом өссөн нь соронзон заагийг хүчтэй шахах үндсэн нөхцөл болжээ.



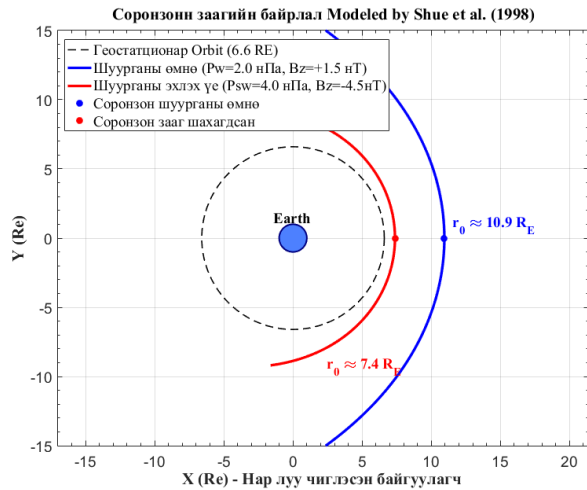
Зураг 3. 2020 оны 12-р сарын 5-ны соронзон шуурганы үеийн нарны салхины параметруудийн өөрчлөлт

Соронзон мандлын зааг ба цохих долгионы шилжилт: Нарны салхины динамик даралт 2 нПа-аас 4 нПа нанопаскалаар ихэссэний улмаас цохих долгионы фронт (*bow shock*) болон соронзон заагийн дэлхийгээс алслагдах зай (*Stand-off Distance*) эрс багассан. Ердийн үед соронзон заагийн байршил дэлхийн радиусаар (R_e) илэрхийлбэл 10-12 R_e зайд байдаг бол, энэ үзэгдлийн үед хүчтэй шахалтын улмаас соронзон зааг зарим уртрагт 7 R_e хүртэл дотогшоо шилжиж, соронзон мандлын геометр хэлбэр илүү "хавтгай" хэлбэртэй болж өөрчлөгдсөн байна [10].



Зураг 4. 2020 оны 12-р сарын 5-ны шуурганы үеийн Cluster хиймэл дагуулын GSE координатын систем дэх байрлал.

OMNI хиймэл дагуулын хэмжилтээр нарны салхины динамик даралт соронзон шуурга эхлэхээс өмнө 2 нПа байснаас оргил үедээ 4 нПа хүртэл огцом ихэссэн байна (Зураг 3).

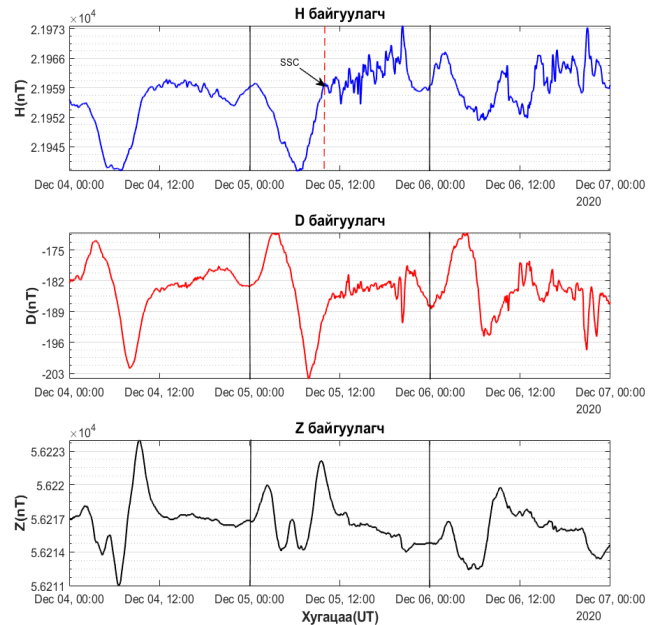


Зураг 5. Shue et al. (1998) загвараар тооцоолсон соронзон заагийн шахалт

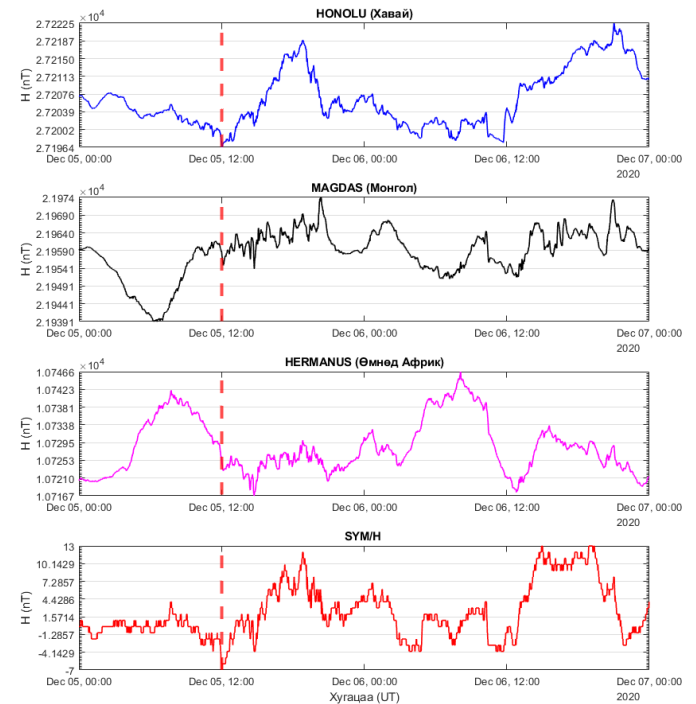
Үүнтэй зэрэгцэн ГХСО-ны B_z байгуулагч сөрөг утгатай буюу -4.5 нТл болж өөрчлөгдсөн. Эдгээр бодит параметрийг олон улсад стандарт сүлжээнд ашигладаг [10] аналитик загварт орлуулан бодоход соронзон заагийн алслалт ердийн үеийн (10-12) R_e зайнаас соронзон шуурганы үед дэлхийн гадаргуу руу чиглэн хүчтэй шахагдаж $r_0=7.4 R_e$ зайд шилжсэн үр дүн гарав. Энэхүү тооцоолол нь газар дээрх соронзон станцуудад ажиглагдсан соронзон орны огцом импульс (SI)-ийн физик механизм болон хэмжилтийн утгуудтай бүрэн нийцэж байна. Энэ тооцооллыг MATLAB программ дээр код бичиж бүрэн тооцооллыг хийв (Зураг 5).

Соронзон оргилуудын сүлжээ станцуудын ажиглалт: Монгол орны нутаг дэвсгэр болон бүс нутгийн MAGDAS, INTERMAGNET сүлжээний станцуудын магнитограмм дээр соронзон орны хэвтээ байгуулагч (H)-ийн огцом өсөлт бүртгэгдсэн нь огцом импульс (SI)-ийн илрэл байв (Зураг 6, Зураг 7). Соронзон заагийн шахалт болон Chapman-Ferraro гүйдлийн өөрчлөлт нь дэлхийн гадаргуу дээрх соронзон орны эрчмийг огцом

өсгөдөг физик зүй тогтолтой.

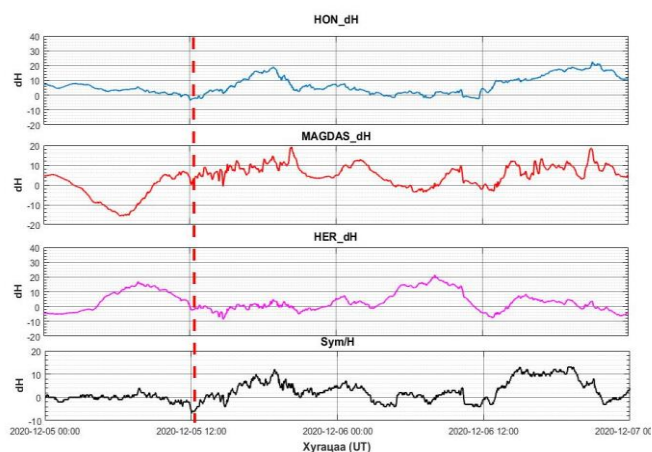


Зураг 6. Монгол оронд бүртгэгдсэн 2020 оны 12-р сарын 4-6-ны соронзон шуурганы үед ажиглагдсан шуурганы эхлэл. Соронзон орны хувьслыг H (нТл), D (нТл), Z (нТл) байгуулагчдаар харуулав.



Зураг 7. Соронзон оргилуудын сүлжээ станцууд дахь соронзон орны хэвтээ H (нТл) байгуулагчийн өөрчлөлтийн харьцуулсан судалгаа

Орон зайн ба цаг хугацааны харьцуулсан анализ хийхэд соронзон хувьсал OMNI хиймэл дагуулын өгөгдөлд 2020 оны 12-р сарын 05-ны 11:06 UT (UT-олон улсын цаг)-д бүртгэгдсэн соронзон мандлын гадна зааг дээрх өөрчлөлт нь газар дээрх соронзон станцуудын өгөгдөлд 2020 оны 12-р сарын 05-ны 12:03 UT-д ажиглагдсан. Энэ нь нарны салхины импульс соронзон заагийн байрлалаас дэлхийн гадаргуу хүртэл ойролцоогоор 57 минутын хоцрогдолтой (*propagation time delay*) дамжсан болохыг тогтоов. Шуурганы үндсэн үе шатын явцад Монгол оронд байрлах MAGDAS болон олон улсын бусад оргилуудад (INTERMAGNET-HON, HER,) *H*-байгуулагчийн утга буурч байгаа нь ажиглагдсан (Зураг 8).



Зураг 8. MAGDAS болон INTERMAGNET станцуудын *H*(нТл) байгуулагчийн огцом буудалтууд

2020 оны 12-р сарын 5-6-ны соронзон орны өөрчлөлт наран дээр тэсрэлт болсны улмаас үүсэх титмийн масс шидэгдэлттэй холбоотой соронзон шуурганы механизм юм. ГХСО-ийн өмнө чиглэсэн B_z байгуулагч нь соронзон дахин нэгдэх процессыг идэвхжүүлж, нарны салхины энерги дэлхийн соронзон мандал руу дамжих эх үүсвэр болсон. Нарны салхины плазмын хүчтэй өөрчлөлтүүд, соронзон заагийн шахалт нь SI үүсэх үндсэн нөхцөл болсон бөгөөд газар дээрх соронзон оргилуудын магнитограммын өгөгдөлтэй сайн тохирч байна. Энэ судалгаа нь сансрын цаг уурын таамаглал боловсруулах, технологийн системийн эрсдэлийг үнэлэхэд чухал ач холбогдолтой юм.

5. Дүгнэлт

1. 1995-2026 оны хооронд Монгол орны бүс нутагт бүртгэгдсэн 356 соронзон шуургыг каталогжуулснаар сансрын цаг уурын урт хугацааны хандлагыг судлах суурь мэдээллийн санг бүрдүүлэв.
2. 2020 оны 12 дугаар сарын 5-6-ны соронзон шуурга нь Наран дээр болсон титмийн масс шидэгдэлт (СМЕ)-ийн улмаас үүссэн гарал үүсэл бүхий шуурга болох нь батлагдлаа.
3. ГХСО-ийн өмнө зүг чиглэсэн B_z -байгуулагч нь соронзон орны хүчний шугам дахин нэгдэх процессыг идэвхжүүлж, нарны салхины энерги соронзон мандал руу дамжих гол суваг болсон байна.
4. Нарны салхины даралтын нөлөөгөөр соронзон заагийн байрлал дэлхий рүү 7Re хүртэл шахагдсанаар газар дээрх соронзон орны хувьсалд огцом импульс (SI) үүсгэсэн бөгөөд сансрын хиймэл дагуулуудын өгөгдөл болон газрын соронзон оргилуудын өгөгдлийн хооронд 57 минутын хугацааны хоцрогдолтой байна.
5. Бүс нутгийн соронзон оргилуудын магнитограммын өгөгдөл нь нар дэлхийн хооронд байрлах хиймэл дагуулын хэмжилтүүдтэй физик механизмын хувьд маш сайн тохирч байна.

Талархал

Энэхүү судалгааны ажлыг ШУА-ийн Одон Орон Геофизикийн Хүрээлэнгийн суурь судалгааны төслийн санхүүжилтээр гүйцэтгэсэн болно. Судалгаанд ашигласан хиймэл дагуулын болон нарны салхины өгөгдлийг нээлттэй ашиглах боломжоор хангасан NASA-гийн OMNIWeb (GSFC) мэдээллийн сан, олон улсын соронзон оргилуудын INTERMAGNET сүлжээ болон Кюшү Их Сургуулийн MAGDAS төслийн хамт олонд гүн талархал илэрхийлж байна. Мөн өгүүллийг бэлтгэх явцад мэргэжлийн үнэтэй зөвлөгөө өгч, дэмжлэг үзүүлсэн тус хүрээлэнгийн соронзон судлалын хамт олонд баярлалаа.

Ишлэлд ашигласан материал

- [1] M. G. Kivelson and C. T. Russell, Eds., Introduction to Space Physics, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1995.
- [2] T. Araki, "A physical model of the geomagnetic sudden commencement," Geophysical Monograph Series, 81, pp. 183–200, 1994. <https://doi.org/10.1029/GM081p0183>
- [3] T. I. Pulkkinen, "Space Weather: Terrestrial Perspective," Living Reviews in Solar Physics, 4(1), Article 1, 2007. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2007-1>
- [4] R. C. Carrington, "Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859," Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 20, pp. 13–15, 1859.
- [5] S. Chapman and V. C. A. Ferraro, "A new theory of magnetic storms," Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity, 36(3), pp. 171–186, 1931. <https://doi.org/10.1029/TE036i003p00171>
- [6] J. W. Dungey, "Interplanetary magnetic field and the auroral zones," Physical Review Letters, 6(2), pp. 47–48, 1961. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.47>
- [7] E. N. Parker, "Interaction of the solar wind with the geomagnetic field," The Physics of Fluids, 1(3), pp. 171–187, 1958. <https://doi.org/10.1063/1.1724339>
- [8] W. D. Gonzalez, J. A. Joselyn, Y. Kamide, H. W. Kroehl, G. Rostoker, B. T. Tsurutani, and V. M. Vasyliūnas, "What is a geomagnetic storm," Journal of Geophysical Research: Space Physics, 99(A4), pp. 5771–5792, 1994. <https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- [9] B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez, A. L. C. Gonzalez, F. L. Guarnieri, N. Gopalswamy, M. Grande, et al., "Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review," Journal of Geophysical Research: Space Physics, 111(A7), Article A07S01, 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011273>
- [10] J.-H. Shue, P. Song, C. T. Russell, J. T. Steinberg, J. K. Chao, G. Zastenker, O. L. Vaisberg, S. Kokubun, H. J. Singer, T. R. Detman, and H. Kawano, "Magnetopause location under extreme solar wind conditions," Journal of Geophysical Research: Space Physics, 103(A8), pp. 17691–17700, 1998. <https://doi.org/10.1029/98JA01103>
- [11] Y. Kamide and A. C.-L. Chian, Eds., Handbook of the Solar-Terrestrial Environment, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-46315-3>
- [12] T. Iyemori, "Storm-Time Magnetospheric Currents Inferred from Mid-Latitude Geomagnetic Field Variations," Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 42, pp. 1249–1265, 1990. <https://doi.org/10.5636/jgg.42.1249>
- [13] J. Liu, S. Chakraborty, X. Chen, Z. Wang, F. He, Z. Hu, E. Liu, A. Bat-Erdene, et al., "Transient Response of Polar-Cusp Ionosphere to an Interplanetary Shock," Journal of Geophysical Research: Space Physics, 128(3), e2022JA030565, 2023. <https://doi.org/10.1029/2022JA030565>

RESEARCH ON SOLAR-TERRESTRIAL INTERACTIONS AND REGIONAL GEOMAGNETIC STORM VARIATIONS

J.Munkhzul, B.Amarjargal

MAS Institute Astronomy and Geophysics, munkhzul.j@iag.ac.mn

PACS number: 94.30.Vf, 94.30.Lr, 96.60.ph

Keywords: *Geomagnetic storm, magnetosphere, coronal mass ejection (CME), solar wind, magnetic reconnection.*

Abstract

This study presents a newly compiled long-term catalog of geomagnetic storms observed over the Mongolian region during the period 1995-2026 and investigates their statistical characteristics, with particular emphasis on the intense geomagnetic storm that occurred on 5-6 December 2020. Data obtained from the space-based OMNI database and ground-based INTERMAGNET and MAGDAS magnetometer networks were employed to conduct a comprehensive temporal and spatial analysis of geomagnetic field variations, focusing primarily on the horizontal (H) component. The catalog comprises 356 geomagnetic storm events and reveals a strong relationship between storm occurrence, intensity, and the approximately 11-year solar activity cycle. Analysis of the selected storm event indicates that a sudden enhancement in the dynamic pressure associated with a coronal mass ejection (CME) significantly compressed the terrestrial magnetopause to approximately 7 Earth radii (RE), producing a pronounced geomagnetic sudden impulse (SI) detected by ground-based observatories. The sustained southward orientation of the interplanetary magnetic field (IMF) Bz component facilitated magnetic reconnection at the dayside magnetopause, providing an efficient mechanism for solar wind energy transfer into the magnetosphere. The propagation time of the solar wind dynamic pressure pulse from the magnetopause to the Earth's surface was estimated to be approximately 57 minutes. Furthermore, the substantial depressions observed in the H-component at regional observatories exhibit strong consistency with global satellite measurements, indicating close agreement in the physical processes governing geomagnetic storm development and magnetospheric response.