



Analysis of Ionospheric Responses During the Strong Geomagnetic Storm of 2024

Amarjargal Bat-Erdene^{1*}, Munkhzul Jargalnemekh¹, Sukhbaatar Usnekh¹, and Gantsogt Sukhbaatar¹

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

Received: 2025-10-15, Accepted: 2025-12-05, <https://doi.org/10.5564/mjag.v12i1.5187>

*Corresponding author: amarjargal98@iag.ac.mn 0000-0002-5015-6105

Abstract

A major geomagnetic storm occurred on May 10–11, 2024, coinciding with Mother's Day, and was classified as the most intense geomagnetic event since the 2003 "Halloween Storms". This storm induced significant disturbances in the magnetosphere–ionosphere system, driven by enhanced solar wind and interplanetary magnetic field (IMF) conditions. Observations from both ground-based instruments and low-Earth orbit satellites revealed a marked depletion in plasma density within the ionosphere, occurring within just a few hours after the onset of the storm. This depletion was particularly evident in the dawn and dusk sectors, where plasma flows were significantly suppressed. Ground-based measurements at magnetic latitudes above 50° also recorded substantial decreases in electron density. These geomagnetic variations were recorded by instruments installed at geomagnetic observatories. The initial depletion emerged near the polar cap during the early morning hours and subsequently expanded equatorward into the auroral and mid-latitude regions. The intense magnetospheric convection, driven by the storm-enhanced solar wind, is believed to have contributed to the erosion of the dayside plasmasphere, resulting in widespread plasma outflow and redistribution. The depleted ionospheric plasma density persisted for approximately three days post-storm before returning to pre-disturbance levels. Such ionospheric irregularities can critically affect space-based technologies, including satellite communications, GNSS-based navigation (e.g., GPS), and radio wave propagation. The instability of the ionosphere under geomagnetic storm conditions highlights the vulnerability of technological systems to extreme space weather events.

Keywords: Solar wind, Convection, Interplanetary Magnetic Field (IMF), Global Positioning System (GPS), Total Electron Content (TEC), Plasma density, Space weather.

1. Удиртгал

1958 он хүртэл дэлхийн соронзон орныг энгийн диполийн бүтэцтэй, огторгуйд хязгааргүй тархах статик орон гэж үздэг байв. Гэвч сансрын хиймэл дагуул, пуужингийн шууд хэмжилтүүдийн үр дүнд дэлхийн соронзон орон нь гадаад сансрын орчны нөлөөн дор байнга хувьсан өөрчлөгдөж байдаг дина-

мик систем болох нь тогтоогдсон. Ялангуяа (Dungey, 1961) нар-дэлхийн харилцан үйлчлэлийн онолын загварыг дэвшүүлж, нарны салхи ба дэлхийн соронзон орны соронзон нэгдэх (magnetic reconnection) механизмыг тайлбарласнаар соронзон мандлын орчин үеийн ойлголтын суурь тавигдсан (Dungey, 1961).

Нарнаас тасралтгүй цацрах цэнэгт бөөмсийн урсгал болох нарны салхины онолын үндсийг (Parker, 1958) боловсруулсан. Нарны салхи нь дунджаар 300–500 км/с хурдтай, ойролцоогоор 5–10 бөөм/³ нягттай, ихэвчлэн устөрөгчийн плазмаас тогтдог бөгөөд дэлхийн соронзон орныг нар тусах талд нь шахаж, шөнийн талд нь сунган урт сүүл (magnetotail) үүсгэдэг. Ийнхүү нарны салхи ба дэлхийн соронзон орны харилцан үйлчлэлийн үр дүнд үүсэх бүтцийг дэлхийн соронзон мандал (magnetosphere) гэж нэрлэнэ. Соронзон мандлын гадаад хил болох magnetopause нь дунджаар дэлхийн радиусаас 7–10 дахин их зайд орших бөгөөд энд нарны салхины динамик даралт ба дэлхийн соронзон орны даралт тэнцвэржинэ. (Parker, 1958)

Дэлхийн соронзон мандал нь гаригийг гадаад сансрын их энергитэй цацраг, цэнэгт бөөмсөөс хамгаалах үндсэн хамгаалалтын систем юм. Анхны хиймэл дагуулын хэмжилтээр дэлхийн орчимд их энергитэй ион, электроноос тогтох цацраг идэвхт бүслүүрүүд оршдогийг (Van Allen, 1959) нээсэн. Эдгээрийг Ван Аллены цацрагийн бүслүүр гэж нэрлэх бөгөөд дотоод бүслүүрт протон давамгайлж, гадаад бүслүүрт өндөр энергитэй электронууд зонхилдог (Van Allen, 1959; Baker, 2004). Нарны идэвхжил, тухайлбал титмийн масс шидэгдэлт (CME) дэлхийн орчинд хүрэх үед соронзон орны хэлбэлзэл эрчимжиж, радиацийн бүслүүрийн бөөмсийн энерги ба (Prölss, 2008) Соронзон мандал ба цэнэгт мандлын харилцан үйлчлэлийн үр дүнд цэнэгт бөөмүүд соронзон хүчний шугам дагуу туйлын бүс рүү чиглэн доош хөдөлж, дээд агаар мандлын атом, молекулуудтай мөргөлдөн туйлын туяа (aurora) үүсгэдэг (Akasofu, 1981). Энэ процесс нь нар-дэлхийн энергийн солилцооны тод илрэл бөгөөд соронзон мандлын динамикийг илэрхийлэх чухал үзүүлэлт болдог. Соронзон шуурганы үед дэлхийн агаар мандлын хамгийн мэдрэмтгий давхарга болох цэнэгт мандал (ионосфер) ихээхэн өөрчлөлтөд ордог. Цэнэгт мандал нь орон зай, цаг хугацааны хувьд өндөр хувьсамтгай плазмын орчин бөгөөд нарны салхинаас дамжин ирэх энерги, импульсийн нөлөөгөөр плазмын нягт,

температур, химийн найрлага, динамик процессууд нь огцом өөрчлөгдөнө.

(Buonsanto, 1999; Wood, 2022) Судалгаагаар соронзон шуурганы гол үе шатанд дунд болон дээд өргөргийн F-давхаргын электроны нягт нэмэгдэх үзэгдлийг эерэг цэнэгт мандлын буснил (positive ionospheric storm) гэж нэрлэдэг бол шуурганы сэргэлтийн шатанд плазмын нягт дэлхий даяар буурахыг сөрөг цэнэгт мандлын буснил (negative ionospheric storm) гэж нэрлэдэг. (Buonsanto, 1999; Ratovsky, 2018) Хүчтэй шуурганы үед ($Dst < -400$ нТ, $Kp = 9$) нарны салхины их хэмжээний энергийн нөлөөгөөр цэнэгт мандлын бүтэц илүү эрчимтэй өөрчлөгдөж, плазмын конвекц огцом нэмэгддэг (Sojka, 1994).

Тухайлбал, 1989 оны гуравдугаар сарын хүчтэй соронзон шуурганы ($Dst = -589$ нТ) үеийн судалгаагаар дунд болон дээд өргөргийн цэнэгт мандлын динамик бага идэвхжилтэй үеийнхээс эрс ялгаатай болж, туйл орчмын бүсэд плазмын нягт буурч, конвекцийн хурд эрс нэмэгдсэн нь тогтоогдсон.

(Buonsanto, 1999). Энэ нь соронзон шуурганы үед соронзон мандал-цэнэгт мандал бүхэлдээ дахин өөрчлөлтөд ордгийг харуулж байна. Иймээс соронзон шуурганы үед цэнэгт мандлын бүтэц, динамик өөрчлөлт, энергийн дамжуулалтын механизмыг олон эх үүсвэрийн хэмжилтэд тулгуурлан судлах нь сансрын цаг агаарын нөлөөллийг үнэлэх, хиймэл дагуулын систем, навигаци болон радио холбооны найдвартай ажиллагааг хангахад онцгой ач холбогдолтой юм.

2. Материал ба судалгааны аргазүй

2024 оны 5 дугаар сарын 10–11-нд болсон асар хүчтэй соронзон шуурганы үед соронзон хувьслын өөрчлөлтийн хэмжүүр болох идэвхжилийн Kp индекс $Kp = 9$ түвшинд хүрсэн бөгөөд соронзон шуурганы үеийн цагираг гүйдлийн эрчмийг илэрхийлэх идэвхжилийн Dst индекс 5 дугаар сарын 11-ний 02:00 (UT)-д $Dst = -412$ нТ, харин 02:14 (UT)-д SYM/H индекс $= -518$ нТ хүрч огцом буурсан байна. Энэхүү үзэгдэл нь соронзон мандал ба цэнэгт мандлын харилцан үйлчлэлийн хүчтэй өөрчлөлтийг

судлах онцгой тохиолдол болж өгч байна.

Нарны салхи ба гариг хоорондын соронзон орны өгөгдөл

Нарны салхины плазмын параметрууд (хурд, нягт, динамик даралт) болон гариг хоорондын соронзон орны (IMF) бүрэлдэхүүнүүдийг NASA-ийн OMNI өгөгдлийн сангаас авсан (King, 2005). OMNI өгөгдлийн сан нь ACE, DSCOVR зэрэг хиймэл дагуулын хэмжилтийг нэгтгэн, Дэлхийн нумын цэг (bow shock)-т шилжүүлэн хугацааны засвар хийсэн 1 минутын болон 5 минутын нарийвчлалтай өгөгдлийг агуулдаг. Судалгаанд гариг хоорондын соронзон орны (ГХСО, IMF-ийн) B_z -байгуулагч, соронзон орны хүч ($|B|$), нарны салхины хурд (V_{sw}), протоны нягт (N_p), нарны салхины учруулах динамик даралт (P_d)-ын өгөгдлөөр судалгааг хийв.

Соронзон орны идэвхжилийн индексүүд

Соронзон орны идэвхжилийг үнэлэх зорилгоор дараах индексүүдийг ашиглав. Үүнд:

- SYM/H индекс (1 минутын нарийвчлалтай) – шуурганы цаг хугацааны нарийвчилсан хувьслыг тодорхойлох;
- Dst индекс (1 цагийн нарийвчлалтай) – цагираг гүйдлийн эрчмийг үнэлэх;
- Kp индекс (3 цагийн нарийвчлалтай) – дэлхийн хэмжээний соронзон идэвхжилийн ерөнхий түвшнийг илэрхийлэх зорилгоор мэдээллийн өгөгдлийн санг бүрдүүлэв.

Kp индекс (3 цагийн нарийвчлалтай) – дэлхийн хэмжээний соронзон идэвхжилийн ерөнхий түвшнийг илэрхийлэх зорилгоор мэдээллийн өгөгдлийн санг бүрдүүлэв.

Kp индексийг GFZ German Research Center for Geosciences-ийн албан ёсны мэдээллийн сангаас авсан. SYM-H, индексийг дэлхийн соронзон станцуудын сүлжээний 1 минутын өгөгдөлд тулгуурлан боловсрууллаа.

Газарт суурилсан соронзон орны мэдээллийн сан

Монгол орны нутаг дэвсгэрт байрлах МАГДАС (MAGDAS – Magnetic Data Acquisition

System) соронзон станцын өндөр нарийвчлалтай (1 секунд–1 минут) өгөгдлийг ашиглав. MAGDAS сүлжээ нь Kyushu University-ийн удирдлага дор дэлхий даяар тархсан станцуудын сүлжээ бөгөөд экватор болон дунд өргөргийн соронзон орны богино хугацааны хэлбэлзлийг судлахад өргөн хэрэглэгддэг.

Цэнэгт мандлын өгөгдөл (GNSS-TEC)

Цэнэгт мандлын орон зайн бүтэц, динамик өөрчлөлтийг тодорхойлох зорилгоор Глобал навигацийн хиймэл дагуулын систем (GNSS)-ийн хэмжилтээс гарган авсан электроны нийт агууламж (Total Electron Content, TEC)-ийн тархалтыг ашигласан. TEC-ийн өгөгдлийг олон улсын GNSS үйлчилгээний (IGS) дэлхийн сүлжээний өгөгдлөөс боловсруулав.

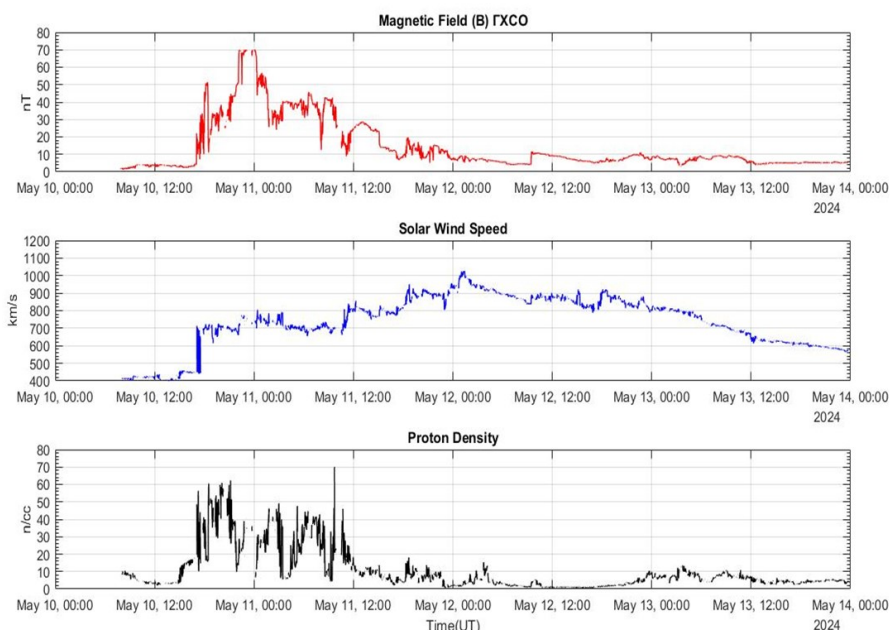
Эдгээр мэдээллийн сан өгөгдлийн үндсэн дээр нарны салхи, соронзон мандал, соронзон идэвхжилийн индекс, соронзон орны өөрчлөлт, цэнэгт мандлын бүтэц гэсэн шаталсан, олон өгөгдлийн сан бүрдүүлж, 2024 оны 5 дугаар сарын хүчтэй шуурганы үеийн харилцан үйлчлэлийг судлах боломж бүрдүүлэв.

3. Судалгааны үр дүн

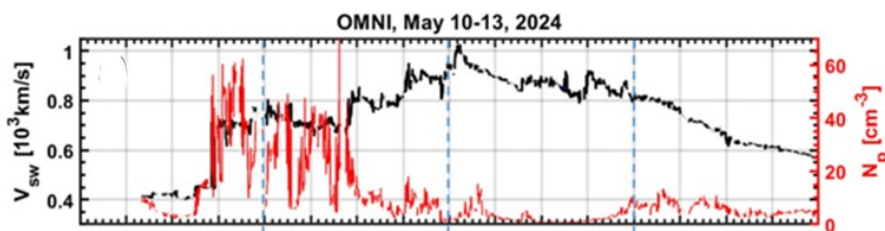
Хиймэл дагуулуудын (WIND) өгөгдлийн сан

2024 оны 5-р сарын 11–13-ны хооронд дэлхий даяар соронзон шуурга ажиглагдан нарны салхины параметрууд ба соронзон идэвхжилийн индексүүд хүчтэй өөрчлөгдлөө. Энэхүү “асар хүчтэй соронзон шуурга”-ны нарны салхины хурд өндөр (1,000 км/с-ээс дээш), протон нягт (60 $^{-3}$ -ээс дээш) их хэд хэдэн дараалсан нарны титмийн масс шидэгдэлтээс (Coronal Mass Ejections, CME) үүссэн ийм соронзон шуурга ажиглагдлаа. Нарны салхины динамик даралт эрс нэмэгдэж, 60 нПа-аас давсан ба үүнтэй зэрэгцэн Гариг хоорондын соронзон орны байгуулагч (ГХСО B_z) 65 нТ-оос дээш нэмэгдэж, соронзон орны хойд байгуулагч ба өмнөд байгуулагч хүчтэй флуктуацид орж (B_z), –40 нТ хүртэл буурсан байна.

Зураг. 1. SYM/H индекс буюу соронзон идэвхжилийг авч үзэхэд соронзон шуурга 2024 оны 5-р сарын 10-ны 17:05 цаг (UT) үед



Зураг 1. OMNI-Хиймэл дагууллын өгөгдлөөр нарны салхины параметруудийн өөрчлөлтийн графикийг харуулав. GXCO- ны байгуулагч $B_z = -60 + 40$ нТ, нарны салхины хурд $V_{sw} = 400-1000$ км/с, нарны салхины динамик даралт $P_{dyn} = 0.5-60$ нПа, гүйдлийн эрчмийг илэрхийлэх соронзон идэвхжил Dst (SYM/H) 497 нТ -д хүрсэн



Зураг 2. 2024 оны 5-р сарын 10-13-ны хооронд нарны салхины хурд ба нарны салхины нягтын хамаарлын графикийг хиймэл дагуулын OMNI өгөгдлөөр харуулав.

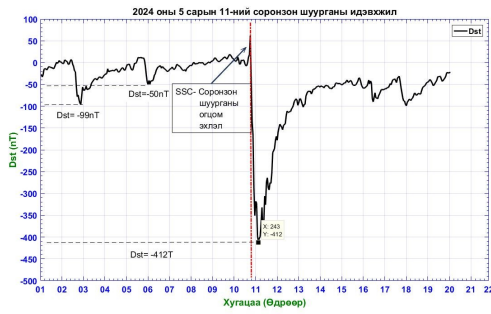
SYM/H индексийн огцом өсөлтөөр (шуурганы огцом эхлэл - SSC) эхэлж, 5-р сарын 11-ний 02:14 цаг (UT)-д SYM/H-ийн хамгийн бага утга -518 нТ-д хүрсэн байна. Соронзон шуурга 5-р сарын 10-ны 18 цаг (UT)-аас 5-р сарын 11-ний 18 цаг (UT) цаг хүртэл хэвээр үргэлжилсэн.

2024 оны 5-р сарын 10-13-ны хооронд нарны салхины параметруудийн өгөгдлөөр судалгаа хийхэд нарны салхины хурд 2024 оны 5-р сарын 10-11 нд ихсэж 5-р сарын 11-нд буцаад 400км/с ийн хурдтай болсон бол нарны салхины нягт энэ хугацаанд буурахгүй 60нПа хүртэл өссөн нь ажиглагдлаа (Зураг. 2).

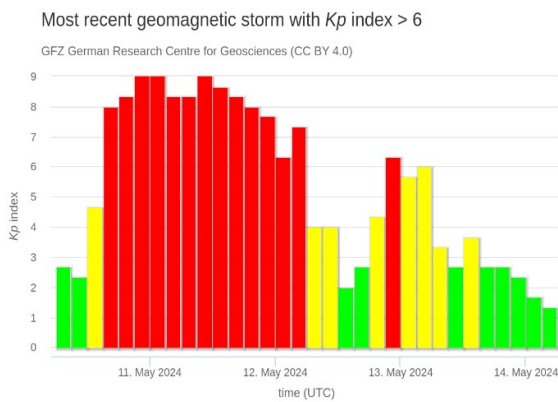
Газарт суурилсан сүлжээ соронзон оргилуудын мэдээлэл

2024 оны 05 дугаар сарын 10-ны өдрийн соронзон шуурганы ерөнхий явцыг SYM/H индексээр харуулав. 2024 оны 5-р сарын 10-ны UT 17:05 цагт SYM/H индексийн огцом өсөлт (шуурганы огцом эхлэл (SSC)) болон хамгийн багадаа SYM/H $= -518$ нТ-д 2024 оны 5-р сарын 11-ний 02:14 UT -д хүрнэ.

Зураг. 4-аас харахад гариг хоорондын идэвхжил Kp индекс мэдэгдэхүйц нэмэгдэж, 5-р сарын 10-аас 5-р сарын 11-ний 18UT хүртэл 8-р түвшин хүртэл өссөн. MAG-HVD соронзон оргилын мэдээлэл. Соронзон оргил (MAG-HVD)-мэдээллээр 2024 оны 05 дугаар сарын 10-ны өдөр соронзон



Зураг 3. 2024 оны 05 дугаар сарын 10-ны өдрийн соронзон шуурга шуурганы эхлэл, SSC импульс ажиглагдсан цаг, шуурганы гол үе, шуурганы сэргэлтийн үеийг SYM/H индексээр харуулав.



Зураг 4. Kp гариг хоорондын соронзон идэвхжил

орны байгуулагчид- (H,D,Z,T) хүчтэй буснилд орж хэвтээ байгуулагчийн утга 400-412 нТл- аар өөрчлөгдөж соронзон шуурга ажиглагдлаа.

Төлөв байдлыг авч үзэхэд 2024 оны 05 дугаар сарын 11-12-нд электроны нийт агууламж 20-25ТЭС 2024 оны 05 дугаар сарын 10-ны өдрийн соронзон соронзон оргилын мэдээллийг үзэхэд соронзон орны байгуулагчид нь их хэмжээний флукуацид орсон.

Соронзон шуурганы үеийн цэнэгт мандал – GPS

2024 оны 05 дугаар сарын 11-ны өдрийн соронзон шуурганы үеийн цэнэгт мандлын ЭНА-ТЭС 30 нэгж байв.

05 дугаар сарын 13-ны өдрийн соронзон шуурганы үеийн цэнэгт мандлын төлөв байдал өөрчлөгдөж ЭНА 42,5 ТЭС хүрч дараагийн зургаас харахад 05 дугаар сарын 14-16-

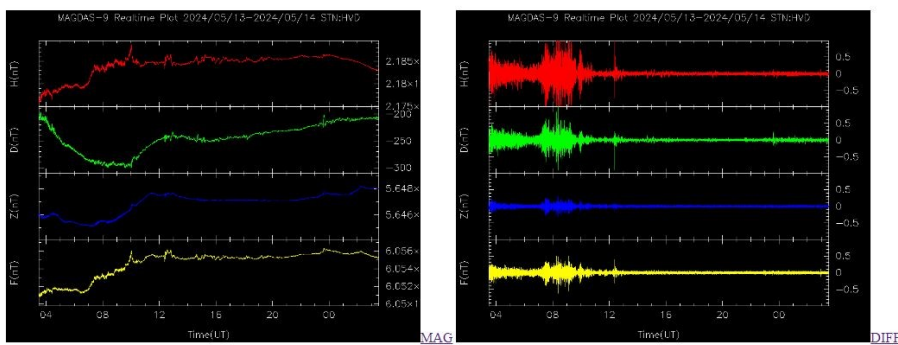
ны өдрийн соронзон шуурганы үеийн цэнэгт мандлын төлөв байдлыг авч үзэхэд электроны нийт агууламж 45-55.5ТЭС хүрч 2-3 хоног хэвээр хадгалагдсан байна.

Соронзон шуурганы дараах цэнэгт мандлын өөрчлөлтийг судлахад, 2024 оны 5 дугаар сарын 10–11-ний “Mothers Day Storm” шуурганаас хойш цэнэгт мандалд их хэмжээний цэнэгт бөөмс агуулагдаж байсан нь ажиглагдсан. Тодруулбал, соронзон шуурганы гол өдрүүдэд нийт электроны агууламж (TEC) бага зэрэг нэмэгдэж байсан бол шуурганы дуусах өдөр буюу 5 дугаар сарын 13-ны өдрийн TEC нь 45-55.5 нэгж хүртэл огцом өсөж, дараагийн өдрүүдэд (5 дугаар сарын 14–16) харьцангуй тогтвортой хэвээр хадгалагдсан. Энэ нь шуурганы дараах сэргэлтийн шатанд цэнэгт мандлын плазмын хуримтлал, электроны тархалт богино хугацаанд ихэссэн болохыг харуулж байна.

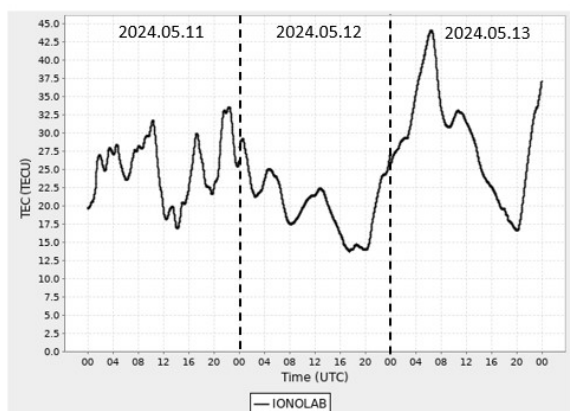
Дэлхийн соронзон орны өөрчлөлтийг цэнэгт мандлын өөрчлөлттэй харьцуулан судлах судалгаанууд олон байдаг. Жишээлбэл, 2015 оны 3 дугаар сарын 15-ны хүчтэй соронзон шуурганы үеийн судалгаагаар соронзон орны хэвтээ байгуулагчийн утгыг цэнэгт мандлын TEC-ийн өөрчлөлттэй харьцуулахад, шуурганы үеийн цэнэгт мандлын төлөв байдал хувьсан өөрчлөгдөж байгааг тогтоожээ. Тодруулбал, соронзон шуурга ихсэж байсан үед ЭНА-ТЭС (энергитэй ион/электроны TEC) нэмэгдсэн нь соронзон шуурга болон цэнэгт мандлын харилцан үйлчлэлийн шууд илрэл болсон (Amarijargal, 2019).

Эдгээр үр дүн нь соронзон шуурганаас үүссэн энергийн шилжилт, плазмын тархалт, электроны нягтын өөрчлөлт нь цэнэгт мандлын динамик байдлыг хэрхэн өөрчилж байгааг илтгэн харуулж, сансрын цагаар болон GPS, харилцаа холбооны системд үзүүлэх нөлөөллийг үнэлэхэд чухал баримт болж байна.

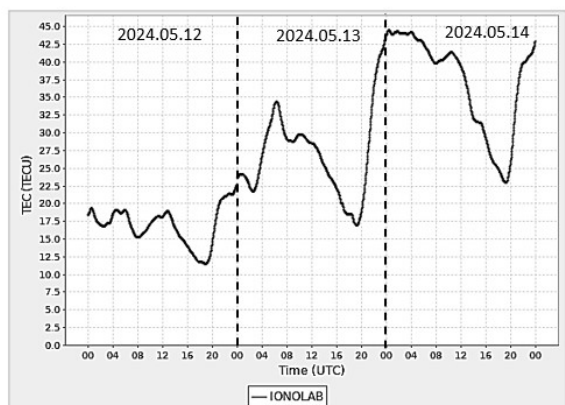
2015 оны 3-р сарын 15-ны соронзон шуурганы үзэгдэл “Geomagnetic storm of St. Patrick’s Day”-ийн үеийн цэнэгт мандлын өөрчлөлтийг судалсан олон судалгаанд тухайн хүчтэй соронзон шуурганы гол үе шатанд цэнэгт мандал дахь электроны нийт



Зураг 5. 2024 оны 05 дугаар сарын 10-ны өдрийн соронзон шуурганы ажиглагдсан байдал. (Ховд соронзон оргилын мэдээлэл)

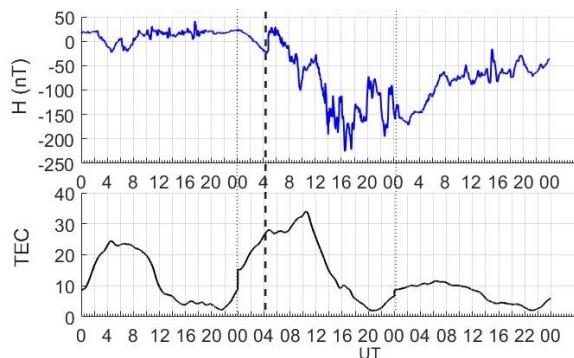


Зураг 6. 2024 оны 05 дугаар сарын 11-нд 20-32, ЭНА, 2024 оны 05 дугаар сарын 12нд 20-22,5 ЭНА, 2024 оны 05 дугаар сарын 13-нд ЭНА огцом өсч 45 ЭНА болж өссөн. ТЕС-ЭНА (Электроны Нийт Агууламж)



Зураг 7. 2024 оны 05 дугаар сарын 14-нээс 2024 оны 05 дугаар сарын 16-ны хооронд цэнэгт мандал дахь 45~55,5 ТЕС-ЭНА (Электроны Нийт Агууламж)

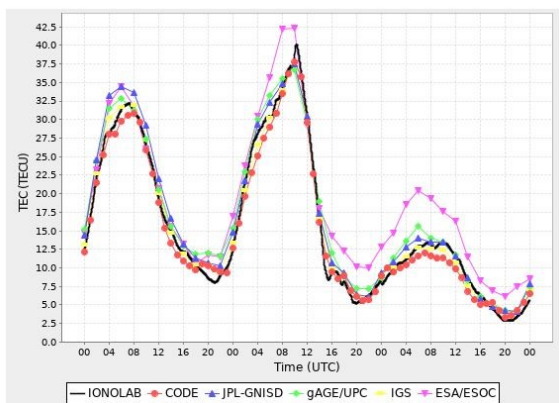
агууламж (ЭНА, буюу ТЭС – Total Electron Content) мэдэгдэхүйц нэмэгдэж байсныг



Зураг 8. Соронзон орны байгуулагчийн ЭНА (Электроны Нийт Агууламж) аас хамаарах хамаарал.

тогтоосон байдаг. Зураг. 9. Харин шуурганы идэвхжил буурч, сэргэлтийн үе шатанд шилжихэд цэнэгт мандлын динамик аажмаар тогтворжиж, ЭНА (ТЭС)-ийн хэмжээ буурах хандлагатай байсан нь ажиглагдсан. Энэ өөрчлөлтийн зүй тогтлыг харуулсан олон судалгаа байдаг. Жишээ нь: Ш.Амаржаргалын 2018 онд хийгдсэн судалгаанд дурдагдсан байдаг. (Ш.Амаржаргал, 2018)

Судалгааны үр дүнгээс үзэхэд, 2024 оны 5 дугаар сарын 10–11-ний “Mothers Day Storm” соронзон шуурганы үеэр цэнэгт мандалд электроны нягт өөрчлөгдөж, зарим бүсэд огцом нэмэгдэж байхад зарим бүсэд электроны хомсдол үүсэх явдал ажиглагдсан. Энэхүү хувилбартай, эсрэг тэсрэг өөрчлөлт нь плазмын конвекцийн хурд нэмэгдсэнтэй шууд холбоотой бөгөөд соронзон мандлын динамик үйл явц, нарны салхины хүчтэй нөлөөгөөр үүссэн эрчимтэй энергийн шилжилттэй уялдан илэрч байна. Иймд хүчтэй соронзон шуурга нь цэнэгт мандлын



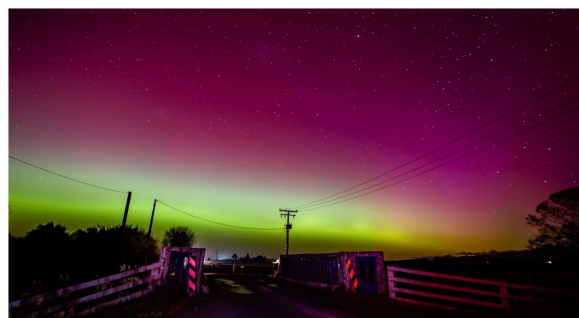
Зураг 9. 2015 оны 3 сарын 15-ны соронзон шуурганы ТЭС ЭНА (Электроны Нийт Агууламж) өөрчлөлтийг Улаанбаатар GPS станцын өгөгдлөөр харуулав.

тогтвортой байдлыг алдагдуулж, сансрын цаг агаарын огцом өөрчлөлтөөр дамжин хиймэл дагуулын ажиллагаа, GPS навигаци, радио холбооны системийн найдвартай ажиллагаанд сөргөөр нөлөөлж болзошгүйг харуулж байна.

Мөн судалгааны ажиглалттай уялдуулан, 2024 оны 5 дугаар сарын 10-ны өдрийн туйлын бүсэд үүссэн туйлын туяа олон гэрэл зурагчдын камерын дуранд маш тод, үзэсгэлэнтэйгээр буусан бөгөөд энэ нь соронзон шуурганы эрчимтэй үйлчлэлийн бодит үзэгдэл юм. Туйлын туяаны тархалт нь плазмын урсгал ба электроны хомсдолын бүсүүдтэй уялдан, агаар мандлын динамикийн онцлогийг илтгэн харуулсан нь сансрын цаг агаар ба цэнэгт мандлын харилцан үйлчлэлийг газар дээрх ажиглалттай шууд холбож байгаа юм.

Ийнхүү сансрын хиймэл дагуулын өгөгдөл, газар дээрх соронзон станцын мэдээлэл, бодит ажиглалт зэрэг олон эх үүсвэрийн нэгдсэн судалгаа нь соронзон шуургаанаас үүсэх цэнэгт мандлын өөрчлөлт, плазмын тархалт, туйлын туяаны онцлогийг илүү нарийвчлан тодорхойлох боломжийг олгож байна. Энэ нь ирээдүйд сансрын цаг агаарын урьдчилсан мэдээ гаргах, хиймэл дагуул, навигаци, харилцаа холбооны системийн аюулгүй ажиллагааг хангахад чухал мэдээлэл шинжлэх ухааны үндэслэл болдог.

2024 оны 05 дугаар сарын 10-ны өдрийн соронзон шуурганы үеийн туйлын туяаны



Зураг 10. 2015 оны 3 сарын 15-ны соронзон шуурганы ТЭС ЭНА (Электроны Нийт Агууламж) өөрчлөлтийг Улаанбаатар GPS станцын өгөгдлөөр харуулав.

харагдах байдал маш үзэсгэлэнтэйг олон гэрэл зурагчид буулгасан байдаг.

4. Дүгнэлт

Судалгааны үр дүнгээс үзэхэд, 2024 оны 5 дугаар сарын 10–11-ний “Mothers Day Storm” соронзон шуурга эхэлснээс хэдхэн цагийн дотор цэнэгт мандлын плазмын нягт огцом буурч, туйл орчмын бүсэд бөөмсийн хомсдол үүссэн нь дунд өргөрөг хүртэл тархсан байна. Энэхүү үзэгдэл нь дэлхийн орчмын сансрын орон зай, гариг хоорондын орчны төлөв байдалд өөрчлөлт өгч, хиймэл дагуулын үйл ажиллагаа, GPS навигаци болон радио холбооны системүүдийн найдвартай ажиллагаанд нөлөөлөх аюултай.

Плазмын нягтын бууралт, электроны хомсдол нь соронзон мандлын тогтвортой байдлыг алдагдуулж, цэнэгт мандлын конвекц, плазмын тархалтын динамикийг өөрчилж байна. Үүний улмаас сансрын орчин хувьсан өөрчлөгдөж, хиймэл дагуулын ажиллагаа доголдож, навигацийн системийн нарийвчлал буурах зэрэг техникийн асуудлууд үүсэх нөхцөл бүрдэж байна. Мөн сансрын цаг агаарын огцом өөрчлөлтөөс шалтгаалан улс орны эдийн засаг, дэд бүтэц, харилцаа холбоо болон тээвэрлэлтийн системд сөрөг нөлөө үзүүлж болзошгүй юм.

Энэхүү судалгаа нь хүчтэй соронзон шуурганы үед цэнэгт мандлын плазмын тархалт, электроны хомсдол, туйлын туяа зэрэг үзэгдлийн механизмыг илүү нарийвчлан ойлгоход чухал ач холбогдолтойгоос гадна ирээдүйд сансрын цаг агаарын эрсдэлийг үнэлэх, хиймэл дагуул, GPS болон харилцаа

холбооны системийг хамгаалах стратегийг боловсруулахад үндсэн мэдээлэл болдог.

5. Талархал

ШУА-ийн ООГХ-гийн соронзон судлалын салбарын хамт олон, олон улсын соронзон оргилуудын мэдээлэл <https://intermagnet.org>, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>, <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>, -д талархал илэрхийлье.

Ашигласан номзүй (References)

- Akasofu, S.-I., 1981. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere, *Space Science Reviews*, **28**(2), 121–190, <https://doi.org/10.1007/BF00218810>.
- Baker, D. N., 2004. An extreme distortion of the van allen belt arising from the "halloween" solar storm in 2003, *Nature*, **432**(7019), 878–881, <https://doi.org/10.1038/nature03116>.
- Buonsanto, M. J., 1999. Ionospheric storms, *Space Science Reviews*, **88**(3-4), 563–601, <https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>.
- Dungey, J. W., 1961. Interplanetary magnetic field and auroral zones, *Physical Review Letters*, **6**, 47–48, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.47>.
- King, J. P., 2005. Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly wind and ace plasma and magnetic field data, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **110**(A2), <https://doi.org/10.1029/2004JA010649>.
- Parker, E. N., 1958. Interaction of the solar wind with the geomagnetic field, *The Physics of Fluids*, **1**(3), 171–175.
- Prölss, G. W., 2008. *Physics of the Earth's Space Environment*, Springer, Berlin, Introduction.
- Ratovsky, K. G., 2018. Ionospheric response to geomagnetic storms at mid-latitudes: Experimental results and modeling, *Advances in Space Research*, **61**(7), 1816–1827, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.08.031>.
- Sojka, J. J., 1994. Ionospheric response to the march 1989 great magnetic storm: Modeling the f region, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **99**(A11), 21341–21352, <https://doi.org/10.1029/94JA01551>.
- Van Allen, J. A., 1959. Radiation around the earth to a radial distance of 107,400 km, *Nature*, **183**, 430–434, <https://doi.org/10.1038/183430a0>.
- Wood, A. G., 2022. Global ionospheric variability and its drivers, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **233**, 105829, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105829>.