



## वैश्विक नौवहन उपग्रह प्रणालियाँ और वायुमंडल के दूरस्थ संवेदन में उनके अनुप्रयोग

अभय कुमार सिंह\*

भौतिक विज्ञान विभाग, बनारस हिन्दू विश्वविद्यालय, वाराणसी, उत्तर प्रदेश, भारत-२२१००५  
लेखक से संवाद के लिए ईमेल\*- singhak@bhu.ac.in

आलेख प्राप्त: २४ मार्च २०२६; अंतिम संशोधित: ०३ अप्रैल २०२६; स्वीकृत: ०४ अप्रैल २०२६  
प्रथम ऑनलाइन प्रकाशित: २६ अप्रैल २०२६

### सारांश

ग्लोबल नेविगेशन सैटेलाइट सिस्टम (जीएनएसएस), जिसे मूल रूप से पोजिशनिंग, नेविगेशन और टाइमिंग (पीएनटी) के लिए बनाया गया था, अब पृथ्वी के वायुमंडल का अध्ययन करने के लिए शक्तिशाली उपकरण बन गए हैं। यह अध्ययन स्पष्ट रूप से बताता है कि वायुमंडलीय प्रक्रियाओं की जांच के लिए जीएनएसएस का उपयोग कैसे किया जा सकता है, जिसमें विशेष रूप से आयनमंडल और क्षोभमंडल पर ध्यान केंद्रित किया गया है। जैसे ही जीएनएसएस सिग्नल वायुमंडल से यात्रा करते हैं, इलेक्ट्रॉन घनत्व और अपवर्तक सूचकांक में भिन्नता के कारण वे विलंबित हो जाते हैं। ये विलंब केवल त्रुटियाँ नहीं हैं; इनका उपयोग कुल इलेक्ट्रॉन सामग्री (टीईसी) और वायुमंडलीय जल वाष्प जैसे महत्वपूर्ण वायुमंडलीय मापदंडों का अनुमान लगाने के लिए किया जा सकता है। यह इस बात पर भी प्रकाश डालता है कि जीएनएसएस से प्राप्त टीईसी का उपयोग भू-चुंबकीय तूफानों, सौर ज्वालाओं, सूर्य ग्रहणों, भूकंपों, गरज के साथ बारिश और उष्णकटिबंधीय चक्रवातों जैसी विभिन्न वायुमंडलीय और आयनमंडलीय घटनाओं का अध्ययन करने के लिए कैसे किया जा सकता है। ये परिघटनाएं आयनमंडल में इलेक्ट्रॉनों के वितरण को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करती हैं और जीएनएसएस अवलोकनों का उपयोग करके प्रभावी ढंग से निगरानी की जा सकती है। कुल मिलाकर, यह अध्ययन दर्शाता है कि जीएनएसएस-आधारित माप स्थलमंडल, वायुमंडल और आयनमंडल के बीच युग्मन, साथ ही अंतरिक्ष मौसम प्रक्रियाओं के बारे में बहुमूल्य जानकारी प्रदान करते हैं। इसलिए, एक विश्वसनीय, किफायती और निरंतर अवलोकन उपकरण के रूप में जीएनएसएस रिमोट सेंसिंग में मौसम पूर्वानुमान, जलवायु अध्ययन और आपदा निगरानी में सुधार करने की अपार संभावना है।

**सूचक शब्द:** जीएनएसएस, पीएनटी, टीईसी, टीईसी, रिमोट सेंसिंग



# Global Navigation Satellite Systems and Their Applications in Remote Sensing of the Atmosphere

Abhay Kumar Singh\*

Department of Physics, Banaras Hindu University, Varanasi, Uttar Pradesh, India -221005  
Corresponding Author Email\*: singhak@bhu.ac.in

Received On: 24 March 2026; Final Revision: 03 April 2026; Accepted On: 04 April 2026  
Published Online First: 26 April 2026

## ABSTRACT

Global Navigation Satellite Systems (GNSS)—originally designed for Positioning, Navigation, and Timing (PNT)—have now evolved into powerful tools for studying Earth's atmosphere. This study clearly demonstrates how GNSS can be utilized to investigate atmospheric processes, with a particular focus on the ionosphere and the troposphere. As GNSS signals traverse the atmosphere, they experience delays caused by variations in electron density and the refractive index. These delays are not merely errors; rather, they can be employed to estimate critical atmospheric parameters, such as Total Electron Content (TEC) and atmospheric water vapor. The study further highlights how TEC data derived from GNSS can be utilized to investigate various atmospheric and ionospheric phenomena, including geomagnetic storms, solar flares, solar eclipses, earthquakes, thunderstorms, and tropical cyclones. These phenomena significantly influence the distribution of electrons within the ionosphere and can be effectively monitored using GNSS observations. Overall, this study demonstrates that GNSS-based measurements provide invaluable insights into the coupling between the lithosphere, the atmosphere, and the ionosphere, as well as into space weather processes. Consequently, as a reliable, cost-effective, and continuous observational tool, GNSS remote sensing holds immense potential for enhancing weather forecasting, climate studies, and disaster monitoring.

**Keywords:** GNSS, PNT, PNT TEC, TEC, Remote Sensing

### लेखक परिचय

अपने शानदार पेशेवर करियर के दौरान, प्रो. अभय कुमार सिंह ने शिक्षण और अनुसंधान के क्षेत्र में बेहतरीन योगदान दिया है। वे कम अक्षांशों पर ऊपरी वायुमंडल के 'स्पेस वेद' (अंतरिक्ष मौसम) अध्ययन और सिंधु-गंगा बेसिन के ऊपर एयरोसोल की विशेषताओं के क्षेत्र में अपने कई महत्वपूर्ण और उत्कृष्ट योगदानों के लिए जाने जाते हैं। वे फसल अवशेष जलाने से उत्पन्न एयरोसोल और पूरे सिंधु-गंगा बेसिन क्षेत्र में उनके लंबी दूरी के परिवहन से जुड़े मुद्दों को सुलझाने में सफल रहे हैं, जिसने वैज्ञानिक समुदाय की सोच पर गहरा प्रभाव डाला है। BATAL अभियानों की एक श्रृंखला के माध्यम से, एशियाई ट्रोपोस्फीयर एयरोसोल (अटल) परत में प्रदूषित एयरोसोल की प्रकृति, निर्माण और परिवहन पर किए गए उनके अध्ययन ने अटल की कई अनसुलझी विशेषताओं को उजागर किया है। सूर्य ग्रहण पर किए गए उनके अध्ययन जिसका विश्लेषण पहली बार आठ अलग-अलग शहरों में किया गया, ने सौर विकिरण और सतह पर मौजूद ओजोन में महत्वपूर्ण कमी, मौसम संबंधी मापदंडों में गतिशील परिवर्तन, और साथ ही वायुमंडलीय गुरुत्वाकर्षण तरंगों द्वारा आयनमंडल में उत्पन्न टीआईडी दोलों को दर्शाया। उनके कार्यों का उल्लेख पुस्तकों, समीक्षाओं और शोध पत्रों में व्यापक रूप से किया गया है। उनका एच-सूचकांक 38 और i10-सूचकांक 109 है, तथा उनके शोध पत्रों को कुल 4891 बार उद्धृत किया गया है। प्रो. सिंह ने 300 से अधिक शोध पत्र प्रकाशित किए हैं, 19 पीएचडी छात्रों का मार्गदर्शन किया है, और 4 करोड़ रुपये की लागत वाली 16 अनुसंधान परियोजनाओं को सफलतापूर्वक पूरा किया है। उन्होंने अकेले ही 'एटमोस्फेरिक रिसर्च लैब' (वायुमंडलीय अनुसंधान प्रयोगशाला) की स्थापना की, जिसे इसरो द्वारा मान्यता प्राप्त है। उन्होंने स्वीडन के उमेआ विश्वविद्यालय में एक वर्ष तक 'बॉयज़कास्ट फेलो' के रूप में कार्य किया। प्रो. सिंह ने कई देशों का दौरा किया, जिनमें नीदरलैंड, इटली, स्वीडन, हंगरी, जापान, दक्षिण कोरिया, तथा अमेरिका के न्यू ऑरलियन्स, पासाडेना और बोस्टन शामिल हैं। उनमें एक प्रभावशाली वैज्ञानिक दृष्टिकोण, प्रयोगात्मक कौशल, उच्च-गुणवत्ता वाला शोध कार्य और विशिष्ट शैक्षणिक क्षमताएँ हैं।



### 1. प्रस्तावना

वैश्विक नेविगेशन उपग्रह प्रणालियाँ (जीएनएसएस) मूल रूप से विश्वव्यापी नागरिक अनुप्रयोगों सहित स्थिति निर्धारण, नेविगेशन और समय निर्धारण (पीएनटी) सेवाएं प्रदान करने के लिए डिज़ाइन की गई थीं। सर्वेक्षण और नेविगेशन के क्षेत्र में जीएनएसएस पिछली सदी के सबसे महत्वपूर्ण नवाचारों में से एक है। आजकल, जीएनएसएस कई प्रकार की सेवाएं प्रदान करती हैं, जिनमें स्थिति निर्धारण, समय निर्धारण, नेविगेशन, मानचित्रण, सार्वजनिक सुरक्षा निगरानी और भौगोलिक सर्वेक्षण, समय मानक, मानचित्रण और मौसम शामिल हैं। आज के तकनीकी समाज में, जीएनएसएस इंटरनेट और मोबाइल संचार के साथ-साथ एक महत्वपूर्ण स्तंभ बन गई है। जीएनएसएस का उपयोग मौसम पूर्वानुमान, प्राकृतिक आपदाओं, जलवायु, पर्यावरण (1-4) और वायुमंडल और आयनमंडल के दूरस्थ संवेदन (5-9) में भी किया जाता है।

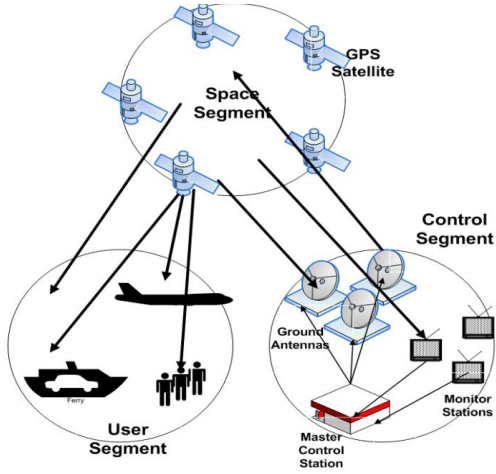
अमेरिकी सेना ने पहला नवस्टार उपग्रह विकसित किया, जिसे 1989 में लॉन्च किया गया और 24वां उपग्रह 1994 में लॉन्च किया गया, जिसके बाद अप्रैल 1995 में इसकी पूर्ण परिचालन क्षमता घोषित की गई। आज, 8000 से अधिक उपग्रह अंतरिक्ष में भेजे जा चुके हैं, जो जीएनएसएस का निर्माण करते हैं और संचार और रिमोट सेंसिंग के अन्य उद्देश्यों के लिए उपयोग किए जाते हैं। वर्तमान में, चार पूर्णतः कार्यरत जीएनएसएस और दो क्षेत्रीय नौवहन उपग्रह प्रणालियाँ (आरएनएसएस) मौजूद हैं। इनमें से दो महत्वपूर्ण और उन्नत जीएनएसएस हैं संयुक्त राज्य अमेरिका की ग्लोबल पोजिशनिंग सिस्टम (जीपीएस) और रूसी संघ की ग्लोबल नेविगेशन सैटेलाइट सिस्टम (ग्लोनास)। दोनों प्रणालियों में 24 उपग्रह हैं। जीपीएस के उपग्रह पृथ्वी की सतह से लगभग 20,200 किमी की ऊंचाई पर तीन कक्षीय तलों में परिक्रमा करते हैं, जबकि ग्लोनास की कक्षा 19,100 किमी पर है। दो अन्य जीएनएसएस यूरोपीय संघ की यूरोपीय उपग्रह नेविगेशन प्रणाली (गैलिलियो) और चीन की बेईडू नेविगेशन उपग्रह प्रणाली हैं।

क्षेत्रीय स्तर पर, भारतीय क्षेत्रीय नौवहन उपग्रह प्रणाली (आईआरएनएसएस, जिसे नाविक भी कहा जाता है) और जापान की अर्ध-जेनिथ उपग्रह प्रणाली (क्यूजेडएसएस), साथ ही कई क्षेत्रीय संवर्द्धन प्रणालियाँ भी उपलब्ध हैं। आईआरएनएसएस को मुख्य रूप से हिंद महासागर के जलक्षेत्र में जहाजों के नौवहन में सहायता के लिए सटीक स्थिति सूचना सेवा प्रदान करने के लिए डिज़ाइन किया गया है। आईआरएनएसएस में 3 उपग्रह भूस्थिर कक्षा में 34, 83 और 132 डिग्री पूर्वी देशांतर पर और 4 उपग्रह भूतुल्यकालिक कक्षा में 29 डिग्री के झुकाव पर स्थित हैं, जिनका देशांतर 55 और 111 डिग्री पूर्वी अक्षांश पर एक दूसरे को काटता है।

### 1. जीपीएस की अवधारणाएँ:

जीपीएस एक सैटेलाइट-बेस्ड रेडियो नेविगेशन सिस्टम है जो दुनिया भर में हर मौसम में लगातार सही जगह की जानकारी, मूविंग रिसीवर की वेगोसिटी और समय देता है। पूरा सिस्टम अमेरिका डिपार्टमेंट ऑफ़ डिफेंस का है और वही इसे चलाता है। इसे मुख्य रूप से अमेरिका मिलिट्री इस्तेमाल के लिए बनाया गया था। लेकिन अब इसे ज्यादातर देशों में आम लोगों की कम्युनिटी में कई तरह के इस्तेमाल के साथ बड़े पैमाने पर इस्तेमाल किया जाता है। जीपीएस को तीन हिस्सों में बांटा जा सकता है (चित्र 1):

- अंतरिक्ष अनुभाग
- संचालन अनुभाग
- उपभोक्ता अनुभाग



चित्र 1: जीपीएस के अनुभाग



चित्र 2: जीपीएस उपग्रहों का समूह

(i) **अंतरिक्ष अनुभाग:** जीपीएस ग्रुप ने उपग्रहों को छह वृत्ताकार कक्षा 20,200 किमी की ऊंचाई पर है, जिसमें कम से कम 24 उपग्रह हैं, जिन्हें हाल ही में 30 या 31 उपग्रह तक बढ़ाया गया है (चित्र 2)। हर उपग्रह का वजन लगभग 2000 पाउंड है और यह 17 फीट चौड़ा है, जिसमें सौर पैनल्स को बढ़ाया गया है, जो उनकी 7.5 साल की अभिकल्पित जीवन से कहीं ज्यादा चलते हैं। छह कक्षाओं भौगोलिक विषुवत रेखा से 55° ऊपर झुके हुए हैं और 60° की दूरी पर हैं। उपग्रहों का कक्षीय अवधि 11 घंटे और 58 मिनट है, जो लगभग आधा नाक्षत्र दिवस है, जिसका मतलब है कि हर दिन उपग्रह लगभग दो पूरे अर्थ रिवर्स पूरे करते हैं। जीपीएस ने दो वाहक आवृत्ति संकेतों  $L_1 = 1575.42$  मेगाहर्ट्ज (तरंग दैर्घ्य = 19.04 सेमी) और  $L_2 = 1227.60$  मेगाहर्ट्ज (तरंग दैर्घ्य = 24.44 सेमी)। नवस्तर जीपीएस के आगे के विकास के तहत 2006 में एक दूसरा सिविलियन नागरिक संकेत  $L_2$  सिविल ( $L_2C$ ) शुरू किया गया था।  $L_5$  नाम का तीसरा नया नागरिक संकेत, जीवन परिवहन की सुरक्षा और दूसरे अनुप्रयोगों का उच्च प्रदर्शन की बढ़ती मांग के लिए 1176.45 मेगाहर्ट्ज की वाहक आवृत्ति और 20.46 मेगाहर्ट्ज की बैंडविड्थ के साथ दिया गया है।

(ii) **संचालन अनुभाग:** जीपीएस का कंट्रोल सेगमेंट इसके सही ऑपरेशन के लिए जिम्मेदार है, जिसमें एक मास्टर नियंत्रण केंद्र, निगरानी केंद्र और ग्राउंड एंटेना होते हैं। मास्टर नियंत्रण केंद्र अमेरिका के कोलोराडो राज्य में श्राइबर वायु सेना बेस पर है। उपग्रहों की चाल और स्थिति को केंद्र निगरानी और

ठीक करते हैं। इसके लिए निगरानी केंद्र से इकट्ठा किए गए माप का इस्तेमाल किया जाता है ताकि हर उपग्रहों के कक्षा और घड़ी के व्यवहार का अंदाजा लगाया जा सके। दुनिया भर में पाँच बेस स्टेशन हैं: एसेंशन आइलैंड (अटलांटिक ओशन), केप कैनावेरल, फ्लोरिडा, डिएगो गार्सिया (हिंद महासागर), हवाई और क्वाजालीन (दोनों प्रशांत महासागर में)। अभी, नेटवर्क में 16 स्टेशन हैं, जिनमें से 6 एयर फ़ोर्स के और 10 नेशनल जियोस्पेशियल-इंटेलिजेंस एजेंसी के हैं। किसी बड़ी खराबी की स्थिति में, दो बैकअप मास्टर कंट्रोल स्टेशन हैं, एक सनीवेल, कैलिफ़ोर्निया और दूसरा रोकविल, मैरीलैंड में। कंट्रोल सेगमेंट का काम यह पक्का करना है कि स्पेस सेगमेंट स्पेसिफिकेशन्स के अंदर काम कर रहा है और जहाँ जरूरी हो, एडजस्टमेंट करना है। कंट्रोल सेगमेंट और जीपीएस सैटेलाइट चार ग्राउंड स्टेशन एंटेना में से एक से S-बैंड अपलिक के जरिए बातचीत करते हैं।

(iii) **उपभोक्ता अनुभाग:** उपभोक्ता अनुभाग में पाँच मॉड्यूल होते हैं, जैसे एंटेना, रिसीवर, संकेत प्रक्रमन, आंकड़ा अभिसंस्करण क्षमताएँ, निवेश निर्गम उपकरण जैसे नियंत्रण प्रदर्शन इकाई, और एक बिजली की आपूर्ति। तीन अलग-अलग उपग्रहों से छद्म परास का इस्तेमाल एक साथ किसी स्थान का निर्देशांक पाने के लिए किया जाता है। यह किसी स्थान के निर्देशांक पाने के लिए नौपरिवहन समीकरण हल करता है। भूतल रिसीवर हर दिखने वाले उपग्रह से रेडियो संकेत लेते हैं और संकेत को रिसीवर तक पहुँचने में लगने वाले समय को मापते हैं। फिर दूरी की गणना की जाती है। असली दूरी पाने के लिए आयन मंडलीय और क्षोभ मंडलीय रेंज सुधार लागू करने की जरूरत होती है।

## 2. जीएनएसएस/जीपीएस माप में त्रुटियाँ:

जीपीएस माप में होने वाली त्रुटियाँ, जो अक्सर 5–15 मीटर तक होती हैं, वायुमंडलीय विलंब, उपग्रह त्रुटियाँ और रिसीवर की त्रुटियाँ की वजह से होती हैं। मुख्य वजहों में आयन मंडलीय और क्षोभ मंडलीय अपवर्तन, उपग्रह घड़ी त्रुटियाँ, इफेमेरिस त्रुटियाँ, सिग्नल बहु-पथ प्रतिबिंब, रिसीवर नॉइज़ और खराब उपग्रह ज्यामिति शामिल हैं।

### (i) जीएनएसएस/जीपीएस माप में आयनमंडलीय त्रुटि:

आयन मंडल में, जीएनएसएस सिग्नल के वाहक चरण और संहिता पर काफ़ी असर पड़ता है। जीएनएसएस सिग्नल में कोड विलंब उपग्रह और रिसीवर [2] के बीच ज्यामितीय दूरी की तुलना में छद्म सीमा माप को प्रभावित करता है और विलंब की परिमाण सिग्नल पथ के साथ आयनमंडल में मौजूद कुल इलेक्ट्रॉन सामग्री (टीईसी) के सीधे आनुपातिक होती है। टीईसी को उपग्रह से रिसीवर तक इलेक्ट्रॉन घनत्व के समाकलन के रूप में परिभाषित किया गया है या दूसरे शब्दों में इसे 1 मीटर<sup>2</sup> अनुप्रस्थ काट क्षेत्र के एक बेलनाकार स्तंभ में मुक्त इलेक्ट्रॉन की संख्या के रूप में परिभाषित किया गया है।

टीईसी में बदलाव दिन के लोकल समय, महीने के दिनों (हर दिन के बदलाव), साल के महीने/मौसम, सौर चक्र के सालों का एक फलन है और इसलिए जीपीएस सिग्नल में आयनमंडलीय त्रुटि भी इन पैरामीटर्स के साथ बदलते रहते हैं। इस तरह जीएनएसएस/जीपीएस सिग्नल में आयनमंडलीय त्रुटि का इस्तेमाल टीईसी की गणना करने के लिए किया जाता है।

### (ii) जीएनएसएस /जीपीएस सिग्नल में वायुमंडलीय त्रुटि:

एरोसोल, सूखी हवा ( $O_2$ ,  $N_2$ ), पानी की भाप, और दूसरी गैसों वायुमंडल के अवयव के तौर पर जानी जाती हैं। क्षोभ मंडल में  $O_2$  और  $N_2$  मुख्य अवयव हैं जो जीपीएस सिग्नल पर असर डालते हैं और इन अवयव को सूखी गैस अवयव और जल वाष्प को गीले अवयव के तौर पर जाना जाता है। वायुमंडल में

जल वाष्प का एक स्थायी द्विध्रुवीय क्षण होता है और इसलिए यह क्षोभमंडलीय रेडियो अपवर्तक सूचकांक को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करता है। सामान्य स्थिति में द्विध्रुव बेतरतीब ढंग से वितरित होते हैं, लेकिन क्षोभमंडल में गुजरने पर रेडियो तरंग के चुंबकीय क्षेत्र के जवाब में द्विध्रुव का आंशिक संरेखण होता है। परिणामस्वरूप माध्यम का ध्रुवीकरण होता है जो क्षोभमंडलीय रेडियो अपवर्तक सूचकांक में योगदान देता है। अपवर्तक सूचकांक भिन्नता के कारण चरण और समूह वेग में परिवर्तन के परिणामस्वरूप कुल चरण और पथ की लंबाई में परिवर्तन होता है जिसका उपयोग क्षोभमंडल में मौजूद जल वाष्प का अनुमान लगाने के लिए किया जाता है [10]।

### 3. जीएनएसएस/जीपीएस का उपयोग करके आयनमंडलीय घटनाओं का अध्ययन:

#### (i) भू-चुंबकीय तूफान की प्रतिक्रिया का अध्ययन:

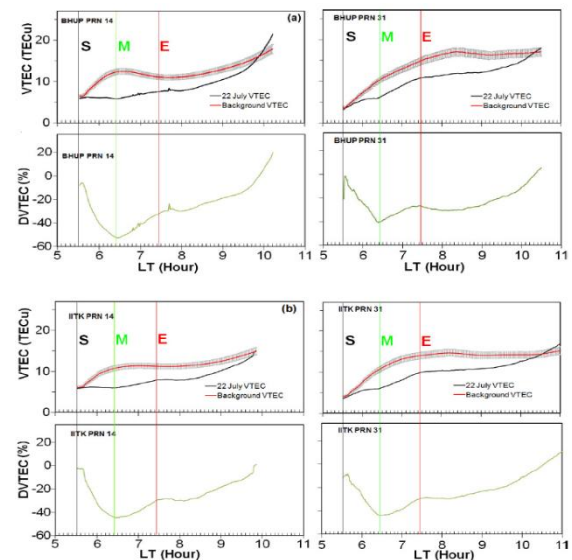
शांत दिन के प्रवृत्ति की तुलना में पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र में एक विघटनकारी परिवर्तन को भू-चुंबकीय तूफान के रूप में पहचाना जाता है। भू-चुंबकीय तूफान तब शुरू होते हैं जब सौर पवन आघात तरंग पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र से संपर्क करती है। सौर पवन का बढ़ा हुआ दाब पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र को दबाता है और इसके कारण चुंबकीय क्षेत्र में बहुत ज्यादा ऊर्जा का स्थानांतरण होती है। भू-चुंबकीय तूफानों को बताने के लिए अशांत तूफान समय सूचकांक (डीएसटी) अपनाया जाता है। भू-चुंबकीय तूफान को तीन मुख्य चरणों में विभाजित किया जाता है: (1) प्रारंभिक चरण (2) मुख्य चरण और (3) पुनर्प्राप्ति चरण। भू-चुंबकीय तूफान के समय के विद्युत क्षेत्र महत्वपूर्ण हैं क्योंकि वे कुछ घंटों से लेकर कई घंटों तक के अलग-अलग समय पैमाने पर प्लाज्मा की गतिशीलता और घनत्व वितरण को काफी हद तक संशोधित करते हैं [11]। भू-चुंबकीय तूफान के समय टीईसी में बढ़ोतरी 10 - 35 टीईसीयू के परिमाण की होती है। आम तौर पर, भू-चुंबकीय तूफानों के दौरान और बाद में टीईसी में बढ़ोतरी या कमी विद्युत क्षेत्र, तटस्थ हवा और लोकल विद्युत का गतिविज्ञान से जुड़ी होती है। भू-चुंबकीय तूफानों के दौरान आयनमंडलीय आयनीकरण वितरण में बहुत बड़े बदलाव होते हैं। आयनमंडलीय घनत्व में इतने बड़े, अचानक बदलाव ज़मीन और अंतरिक्ष में स्थिति निर्धारण और जीपीएस उपग्रह से नेविगेशन के लिए नुकसानदायक होते हैं।

#### (ii) सौर ज्वाला की प्रतिक्रिया का अध्ययन:

सौर ज्वाला कुछ ही मिनटों में सौर प्लाज्मा और प्रकाशीय विकिरण का विस्फोटक विमोचन है। सूर्य के धब्बे के पास चुंबकीय क्षेत्र अक्सर मुड़ता है, एक-दूसरे को काटता है और फिर से जुड़ता है और सौर ज्वाला पैदा करता है। सौर ज्वाला पर आयनमंडलीय प्रतिक्रिया पर अभी का नज़रिया तीन तरह का है। पहला, यह ईयूवी और एक्स-रे प्रवाह के बड़े हुए आयनीकरण पर है। दूसरा, यह पहले प्रभाव से पैदा हुए गतिकी से है, जिसमें संभावित विद्युत का गतिविज्ञान भी शामिल है। एक बड़े सौर ज्वाला के दौरान धूप वाले घंटों में विद्युत क्षेत्र कम होने का सुझाव दिया गया है। तीसरा तापमंडल पर है, तापमंडलीय प्रभाव के लिए, सौर ज्वाला के कारण बहुत ज्यादा तटस्थ घनत्व और तापमान में बदलाव होता है। सौर शीर्ष क्रोण का सौर ज्वाला पर तापमंडल प्रतिक्रिया पर एक अहम नियंत्रित प्रभाव होता है। सॉफ्ट एक्स-रे ई - क्षेत्र में आयनीकरण को कंट्रोल करता है, जबकि ईयूवी ~150 किमी से ऊपर आयनीकरण को कंट्रोल करता है [12]। इसलिए, सौर ज्वाला की लोकेशन टीईसी में तापमंडल-आयनमंडल प्रभाव को बदल देती है। आयनमंडल पर सौर ज्वाला का असर लिम्ब सौर ज्वालाएँ की तुलना में डिस्क केंद्र सौर ज्वालाएँ के लिए ज्यादा पाया गया है [13]।

#### (iii) सूर्य ग्रहण की प्रतिक्रिया का अध्ययन:

सूर्य ग्रहण तब होता है जब चंद्रमा, सूर्य और पृथ्वी के बीच से गुजरता है और चंद्रमा सूर्य को पूरी तरह या आंशिक रूप से ढक लेता है। सूर्य ग्रहण के दौरान सौर विकिरण कम हो जाता है जिससे आयनीकरण कम हो जाता है। इसलिए, ग्रहण के दिन प्लाज्मा की हानि दर, उत्पादन दर पर हावी होती है। सूर्य ग्रहण के दौरान आयनमंडलीय व्यवधान एकल आवृत्ति उपयोगकर्ता के लिए जीपीएस स्थिति निर्धारण में त्रुटियाँ प्रकट कर सकता है [14]। जीपीएस में मापन से सूर्य ग्रहण के दौरान आयनमंडल की बनावट में समय और जगह के हिसाब से होने वाले बदलावों को अध्ययन किया जा सकता है। यह देखा गया है कि 24 अक्टूबर, 1995 और 9 मार्च, 1997 को एशियाई इलाके में अलग-अलग अक्षांश पर हुए दो ग्रहण घटनाएँ के दौरान टीईसी कम हो गई थी [15]। टीईसी की कमी लगभग 7 टीईसीयू पाई गई और सूर्य ग्रहण की पूर्णता के लिए 0-30 मिनट की देरी देखी गई है। अध्ययन से पता चला है कि आंशिक ग्रहण शुरू होने के बाद टीईसी कम हो जाती है। टीईसी अधिकतम अस्पष्टता के समय से ~ 30 मिनट से 2 घंटे बाद न्यूनतम मान पर पहुँच जाती है। यह देरी ईआईए में प्रकाश रासायनिक प्रक्रिया और प्लाज्मा गतिकी के मिले-जुले असर की वजह से होती है। अध्ययन से पता चलता है कि एक बड़े एरिया में ग्रहण के दिन टीईसी में कमी आई है। भूमध्यरेखीय विसंगति के क्षेत्र में शांत स्थितियों के सापेक्ष टीईसी में कमी 40-50 % से अधिक बताया गया है [16]। चित्र 3 में दिखाया गया है शांत औसत वीटीईसी की तुलना में वीटीईसी में भिन्नता, और शांत औसत वीटीईसी की तुलना में वीटीईसी में प्रतिशत परिवर्तन जिसका अनुमान पूर्ण सूर्य ग्रहण की अवधि के दौरान पीआरएन 14 के लिए ~ 51% और पीआरएन 31 के लिए ~ 41% है [17]। चुने गए भारतीय स्टेशन वाराणसी (भौगोलिक अक्षांश 25°16' N, देशांतर 82°59' E) और कानपुर (भौगोलिक अक्षांश 26.28° N और देशांतर 80.2° E) हैं। पीआरएन 14 और 31 उन चुने हुए जीपीएस उपग्रहों को दर्शाते हैं, जिनके आँकड़ा इन दोनों स्टेशनों पर उपलब्ध हैं। पीआरएन 14 के संबंध में वीटीईसी में यह अधिक बदलाव इसलिए हो सकता है, क्योंकि सैटेलाइट सिग्नल का मार्ग पीआरएन 31 की तुलना में अस्पष्टता क्षेत्र से अधिक दूरी तक होकर गुजरता है [17]।



चित्र 3: शांत औसत वीटीईसी की तुलना में वीटीईसी में भिन्नता, और शांत औसत वीटीईसी की तुलना में वीटीईसी में प्रतिशत परिवर्तन जिसका अनुमान पूर्ण सूर्य ग्रहण की अवधि के दौरान पीआरएन 14 और 31 के डेटा से लगाया गया है, स्थान हैं: (a) वाराणसी, (b) कानपुर [17]।

सूर्य ग्रहण के दिन टीईसी में गुरुत्वाकर्षण तरंगों के सिग्नेचर की भी रिपोर्ट की गई है [18]। यह प्रस्तावित है कि गुरुत्वाकर्षण तरंगों के स्रोत तापमंडल में मौजूद हैं जहाँ आणविक ऑक्सीजन का गर्म होना शुरू होती है, समताप मंडल जहाँ ओजोन परत गर्म होती है [19], और क्षोभ मंडल जहाँ जल वाष्प आईआर अवशोषण और भू शीतलन होती है [20]। इस तरह, सूर्य ग्रहण के दौरान टीईसी का लेवल 15–30 मिनट की देरी से कम पाया जाता है। ग्रहण वाले दिन टीईसी पर गुरुत्वाकर्षण तरंगों की मौजूदगी देखी जाती है, जिनका समय 20–50 और 50–90 मिनट होता है।

#### (iv) भूकंपों की प्रतिक्रिया का अध्ययन:

भूकंप प्रकृति की सबसे डरावनी और विनाशकारी घटनाओं में से एक है, और इसके बाद के प्रभाव भी बहुत भयानक होते हैं। इतिहास में, भूकंपों ने कई लोगों की जान ली है और कई समुदायों को तबाह कर दिया है। पिछले 100 सालों के दौरान, हर साल औसतन लगभग 18 बड़े भूकंप (तीव्रता 7.0–7.9) आए हैं (<http://earthquake.usgs.gov>)। भूकंप की भविष्यवाणी का उद्देश्य उन संभावित रूप से खतरनाक इलाकों को समय से पहले चेतावनी देना है, ताकि लोग अपनी जान और माल के नुकसान को कम कर सकें। कई शोध पत्रों में भूकंप से पहले बिजली के क्षेत्र में होने वाली गड़बड़ियों का जिक्र किया गया है [21–23]। ज़मीन की सतह के पास से आयनमंडल में बिजली के क्षेत्र का असामान्य रूप से प्रवेश करने की समस्या का कोई सर्वमान्य समाधान अभी तक नहीं मिला है। मुख्य परिकल्पनाओं में से एक यह है कि पृथ्वी की पपड़ी की दरारों से निकलने वाली रेडॉन गैस, ज़मीन के पास की वायुमंडलीय गैसों का आयनीकरण कर देती है। यह प्रक्रिया वायुमंडल की सीमा परत की वायु चालकता को बदल देती है, और इस तरह वैश्विक विद्युत परिपथ में बदलाव लाती है [24]।

आजकल, आयनमंडल में देखे जाने वाले भूकंप के पूर्व-संकेतों की जाँच पर विशेष ध्यान दिया जा रहा है, क्योंकि ये पूर्व-संकेत बहुत कम समय के लिए होते हैं। आयनमंडल की ई - और एफ - परतों के घनत्व में होने वाले बदलावों को दर्शाने के लिए ज़मीन-आधारित और उपग्रह-आधारित मापों से प्राप्त डेटा का उपयोग किया गया है; भूकंपीय घटनाओं से पहले, भूकंप के केंद्र के ऊपर इन घनत्वों में वृद्धि या कमी हो सकती है [25]। हाल के अध्ययनों से पता चला है कि पूर्वगामी संकेत आयनमंडल की आयनीकरण सामग्री को संशोधित करते हैं, जो टीईसी में परिलक्षित होता है। ज़मीन-आधारित जीपीएस मापों से प्राप्त टीईसी डेटा का उपयोग करते हुए, भूकंपों से कुछ दिन पहले और बाद में टीईसी में होने वाले विक्षोभों की जानकारी विभिन्न शोध-पत्रों [26] में दी गई है। परिणामों से पता चला कि भूकंपों के कारण होने वाला आयनमंडलीय विक्षोभ, भूकंप के केंद्र से अवलोकन बिंदु की दूरी पर, और साथ ही भूकंप के केंद्र के सापेक्ष अवलोकन बिंदु की दिशा पर भी निर्भर करता है। उन्होंने वायुमंडलीय ओजोन में भी विक्षोभ की सूचना दी है। इस प्रकार, आयनमंडल और वायुमंडलीय ओजोन में भूकंप-जनित विक्षोभ, स्थलमंडल-वायुमंडल-आयनमंडल युग्म प्रक्रिया का समर्थन करता है [26]।

#### (v) तूफानों के प्रतिक्रिया का अध्ययन:

आंधी-तूफान बिजली पैदा करने वाले जनरेटर की तरह होते हैं, जो वैश्विक विद्युत सर्किट [27] में ऊपर की ओर धाराएँ प्रवाहित करते हैं और कुछ दसियों किलो एम्पीयर तक की अधिकतम धारा उत्पन्न करते हैं। तूफान से उत्पन्न धारा द्वारा पैदा हुआ विद्युत क्षेत्र  $E \times B$  प्लाज्मा ड्रिफ्ट को प्रभावित कर सकता है, जिससे आयनमंडल में प्लाज्मा घनत्व का पुनर्वितरण होता है और परिणामस्वरूप इलेक्ट्रॉन घनत्व में गड़बड़ी पैदा होती है [28–30]। ऐसी रिपोर्टें आई हैं कि एक छोटे तूफान से जुड़ी विद्युत गतिविधि भी डी-क्षेत्र को प्रभावित करती है, जिससे इलेक्ट्रॉन गर्म हो जाते हैं और उसके बाद इलेक्ट्रॉन घनत्व कम

हो जाता है [31]। तूफानी गतिविधियों से उत्पन्न गुरुत्वाकर्षण तरंगों ऊपर की दिशा में फैलती हैं और आयनमंडल में ऊर्जा स्थानांतरित करती हैं; इस ऊर्जा को आयनमंडल के टीईसी में देखा जा सकता है। कुछ मामलों में, तूफानी गतिविधियाँ आयनमंडलीय प्लाज्मा बुलबुले और सेन्टीलेशन भी उत्पन्न कर सकती हैं [28]। आयनमंडल में इलेक्ट्रॉन घनत्व वितरण में आंधी-तूफान के कारण होने वाले विक्षोभ की जानकारी हाल ही में कई शोधकर्ताओं द्वारा दी गई है [32–36]। टीईसी डेटा में आयनमंडल संबंधी विक्षोभ, बिजली गिरने के केंद्र से लगभग ~500 km और उससे भी अधिक दूरी तक देखा गया है।

#### (vi) चक्रवातों के प्रतिक्रिया का अध्ययन:

निचले वायुमंडल में मौसम-संबंधी कारणों से होने वाली कई घटनाएँ आयनमंडल में होने वाले विक्षोभ को भी प्रभावित कर सकती हैं, और यह आगे के शोध का एक विषय है। इन घटनाओं में गहरा उष्णकटिबंधीय संवहन, उष्णकटिबंधीय चक्रवात, टाइफून, बवंडर, गरज-चमक वाले तूफान, ऊपरी क्षोभमंडल जेट आदि शामिल हैं; ये सभी क्षोभमंडल में मौसम-संबंधी कारणों से उत्पन्न होने वाले कुछ विक्षोभ हैं, और इनसे आयनमंडल में विक्षोभ उत्पन्न होने की संभावना है। मौसम संबंधी मूल की उपर्युक्त विक्षोभों में से, उष्णकटिबंधीय चक्रवात सबसे शक्तिशाली संभावित स्रोतों में से एक हैं, जो वायुमंडल-आयनमंडल युग्म के माध्यम से आयनमंडल को प्रभावित करते हैं। उष्णकटिबंधीय चक्रवात हवा के एक समूह का निम्न-दबाव केंद्र के चारों ओर घूमने की प्रक्रिया है, जिसकी उत्पत्ति क्षोभमंडल के भूमध्यरेखीय क्षेत्र ( $\pm 5^\circ$  और  $\pm 20^\circ$  अक्षांश के बीच) में समुद्र के ऊपर होती है; और इसका मानव जीवन तथा संपत्ति, दोनों पर ही अत्यंत हानिकारक प्रभाव पड़ता है। उष्णकटिबंधीय चक्रवात आयनमंडल को नीचे से अलग-अलग तरीकों से प्रभावित कर सकते हैं। इनमें बादलों वाले वातावरण का बड़े पैमाने पर ऊर्ध्वाधर संवहन शामिल है, जिससे आवेशित पानी की बूंदों और एयरोसोल का ऊपर की ओर परिवहन होता है। इसके अलावा, गुरुत्वाकर्षण तरंगों का एक स्पेक्ट्रम भी उत्पन्न होता है, जो वातावरण-आयनमंडल विद्युत सर्किट को बाधित करता है; और यह आगे चलकर सैकड़ों किलोमीटर के क्षैतिज दायरे में एक बाहरी विद्युत धारा उत्पन्न करता है [37]। हाल के वर्षों में, उष्णकटिबंधीय चक्रवात के कारण आयनमंडल में होने वाले विक्षोभ की मौजूदगी दिखाने के लिए ज़मीन-आधारित जीपीएस-टीईसी मापों का उपयोग किया गया है [38–39]। उष्णकटिबंधीय चक्रवात के दौरान उत्पन्न होने वाली गुरुत्वाकर्षण तरंगों आयनमंडल में अनियमितताओं के उत्पन्न होने के लिए एक बीज का काम कर सकती हैं, जिससे आगे चलकर रेडियो सिंटिलेशन हो सकता है; हांगकांग के पास से गुजरने वाले उष्णकटिबंधीय चक्रवात टेम्बिन के मामले में ऐसी रिपोर्ट सामने आई है [39]।

## 4. निष्कर्ष:

जीएनएसएस/जीपीएस नेविगेशन के लिए एक आदर्श प्रणाली है, और वायुमंडल जिसमें आयनमंडल भी शामिल है, उपयोगकर्ता की स्थिति को सटीक रूप से निर्धारित करने में सबसे बड़ी बाधा है। नुटियों के स्रोत जीपीएस संकेतों के वायुमंडल/आयनमंडल में संचरण के दौरान उनके कला और समूह विलंब के रूप में उत्पन्न होते हैं। इस प्रकार, इन विलंबों की जानकारी से आयनमंडल का टीईसी और वायुमंडल में मौजूद जलवाष्प की मात्रा का पता लगाया जा सकता है; जिनका उपयोग आंधी-तूफान, चक्रवात, भूकंप, सूर्य ग्रहण, मानसून, जलवायु, संख्यात्मक मौसम पूर्वानुमान आदि से जुड़ी विभिन्न वायुमंडलीय और आयनमंडलीय घटनाओं के अध्ययन के लिए किया जाता है।

**संदर्भ ग्रंथ सूची (Bibliography/References)**

- [1] B.W. Crowell, Y. Bock, D. Melgar, Real-time inversion of GPS data for finite fault modeling and rapid hazard assessment, *Geophys. Res. Letts.* 39 (2012), L09305. doi:10.1029/2012GL051318.
- [2] G. Guergana, J. Jones, J. Douša, G. Dick, S. de Haan, E. Pottiaux, O. Bock, R. Pacione, G. Elgered, H. Vedel, M. Bende, Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe, *Atmos. Meas. Tech.* 9 (2016) 5385–5406.
- [3] P. Segall, J.L. Davis, GPS applications for geodynamics and earthquake studies, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 25 (1997) 301–336.
- [4] P. Tregoning, T. van Dam, Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level, *Geophys. Res. Letts.* 32 (2005) 153.
- [5] M. Bevis, S. Businger, A.H. Thomas, C. Rocken, A.A. Richard, R.H. Ware, GPS meteorology' remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, *J. Geophys. Res.* 97 (D14) (1992) 15787–15801.
- [6] N. Jakowski, V. Wilken, S. Schlueter, S.M. Stankov, S. Heise, Ionospheric space weather effects monitored by simultaneous ground and space based GNSS signals, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 67 (12) (2005) 1074–1084.
- [7] S. Kumar, Sarvesh Kumar, Equatorial ionospheric TEC and scintillations under the space weather events of 4–9 September 2017: M-class solar flares and a G4 geomagnetic storm, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 209 (2020) 105421. doi:10.1016/j.jastp.2020.105421.
- [8] I. Zakharenkova, E. Astafyeva, I. Cherniak, GPS and GLONASS observations of large-scale traveling ionospheric disturbances during the 2015 St. Patrick's Day storm, *J. Geophys. Res. Space Phys.* 121 (12) (2016) 12–138.
- [9] D.M. Tralli, T.H. Dixon, S.A. Stephens, Effect of wet tropospheric path delays on estimations of geodetic baselines in the Gulf of California using Global Positioning System, *J. Geophys. Res.* 93 (1988) 6545–6557.
- [10] S. Kumar, A.K. Singh, A.K. Prasad, R.P. Singh, Variability of GPS derived water vapor and comparison with MODIS data over the Indo-Gangetic plains, *J. Phys., Chem. Earth* 55 (2013) 11–18.
- [11] B. Tsurutani, A. Mannucci, B. Iijima, M.A. Abdu, J.H.A. Sobral, A. Humberto, W. Gonzalez, F. Guarnieri, T. Tsuda, A. Saito, K. Yumoto, B. Fejer, T.J. FullerRowell, J. Kozyra, J.C. Foster, A. Coster, V.M. Vasylunas., Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric field, *J. Geophys. Res.* 109 (2004) A08302, doi:10.1029/2003JA010342.
- [12] R. Zhang, L. Liu, H. Le, Y. Chen., Equatorial ionospheric electro dynamics during solar flares, *Geophys. Res. Lett.* 44 (2017) 4558–4565.
- [13] S.G. Sumod, T.K. Pant, An investigation of solar flare effects on equatorial ionosphere and thermosphere using co-ordinated measurements, *Earth, Planets Space*, 71 (2019) 125.
- [14] A. Krankowski, I.I. Shagimuratov, L.W. Baran, G.A. Yakimova, The effect of total solar eclipse of October 3, 2005, on the total electron content over Europe, *Adv. Space Res.* 41 (2008) 628–638.
- [15] H.F. Tsai, J.Y. Liu, Ionospheric total electron content response to solar eclipses, *J. Geophys. Res.* 104 (A6) (1999) 12657–12668.
- [16] J.Y. Liu, H.F. Tsai, M.Q. Chen, Ionospheric total electron content observed during the 24 October 1995 solar eclipse, *Adv. Space Res.* 24 (11) (1999) 1495–1498.
- [17] S. Kumar, A. K. Singh and R. P. Singh (2013) Ionospheric Response to Total Solar Eclipse of 22 July 2009 at different Indian Regions, *Annales Geophysicae*, 31, 1549–1558 doi:10.5194/angeo-31-1-2013
- [18] C.S. Zerefos, E. Gerasopoulos, I. Tsagouri, B.E. Psiloglou, A. Belehaki, T. Herekakis, A. Bais, S. Kazadzis, C. Eleftheratos, N. Kalivitis, N. Mihalopoulos, Evidence of gravity waves into the atmosphere during the March 2006 total solar eclipse, *Atmos. Chem. Phys.* 7 (2007) 4943–4951, doi:10.5194/acp-7-4943-2007.
- [19] C.S. Zerefos, D.S. Balis, C. Meleti, A.F. Bais, K. Tourpali, K. Kourtidis, K. Vanicek, F. Cappelani, U. Kaminski, T. Colombo, R. Stubi, L. Manea, P. Formenti, M.O. Andreae, Changes in surface solar UV irradiances and total ozone during the solar eclipse of 11 August, 1999, *J. Geophys. Res.* 105 (2000) 26463–26473.
- [20] G. Chimonas, C.O. Hines, Atmospheric gravity waves induced by a solar eclipse, *J. Geophys. Res.* 75 (1970) 5545–5551.
- [21] G. Kondo, The variation of the atmospheric electric field at the time of earthquake, *Memoirs Kakioka Magnetic Observatory, Kakioka, Japan* 13 (1968) 17–23.
- [22] V.M. Chmyrev, N.V. Isaev, S.V. Bilichenko, G.A. Stanev, Observation by space – borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an earthquake center, *Phys. Earth Planet. Int.* 57 (1989) 110–114.
- [23] S.A. Pulintsev, Strong earthquake prediction possibility with the help of topside sounding from satellites, *Adv. Space Res.* 21 (1998) 455–458 [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00880-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00880-6).
- [24] S. Priyadarshi, S. Kumar, A.K. Singh, Ionospheric perturbations associated with two recent major earthquakes (M>5.0), *Phys. Scr.* 84 (2011) 045901.
- [25] S. Kumar, A.K. Singh, Ionospheric precursors observed in TEC due to earthquake of Tamenglong on 3 January 2016, *Current Sci.* 113 (4) (2017) 790–795.
- [26] J.Y. Liu, Y.I. Chen, Y.J. Chuo, C.S. Chen, A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly, *J. Geophys. Res.* (2006), doi:10.1029/2005JA011333.

- [27] E.A. Mareev, S.A. Yashunin, S.S. Davydenko, T.C. Marshall, M. Stolzenburg, C.R. Maggio, On the role of transient currents in the global electric circuit, *Geophys. Res. Lett.* 35 (15) (2008) L15810, doi: 10.1029/2008GL034554.
- [28] C.J. Davis, C.G. Johnson, Lightning-induced intensification of the ionospheric sporadic E layer, *Nature* 435 (2005) 799–801, <https://doi.org/10.1038/nature03638>.
- [29] C.J. Davis, K.-H. Lo, An enhancement of the ionospheric sporadic-E layer in response to negative polarity cloud-to-ground lightning, *Geophysical Res. Letters* 35 (2008) (2008) L05815, <https://doi.org/10.1029/2007GL031909>.
- [30] E.H. Lay, X.M. Shao, C.S. Carrano, Variation in total electron content above large thunderstorms, *Geophysical Res. Letters* 40 (2013) 1945–1949, <https://doi.org/10.1002/grl.50499>.
- [31] X.-M. Shao, E.H. Lay, A.R. Jacobson, Reduction of electron density in the night-time lower ionosphere in response to a thunderstorm, *Nat. Geosci.* 6 (2013) 29–33.
- [32] E.H. Lay, X. Shao, A.K. Kendrick, C.S. Carrano, Ionospheric acoustic and gravity waves associated with midlatitude thunderstorms, *J. Geophysical Res. Space Phys.* 120 (2015) 6010–6020, <https://doi.org/10.1002/2015JA021334>.
- [33] T.J. Immel, S.B. Mende, M.E. Hagan, P.M. Kintner, S.L. England, Evidence of tropospheric effects on the ionosphere, *EOS* 90 (2009) 69–70, <https://doi.org/10.1029/2009EO090001>.
- [34] C.G. Johnson, C.J. Davis, The location of lightning affecting the ionospheric sporadic-E layer as evidence for multiple enhancement mechanisms, *Geophysical Res. Letters* 33 (2006) 1–4, <https://doi.org/10.1029/2005GL025294>.
- [35] Kumar, V.V., Parkinson, M.L., Dyson, P.L., Burns, G.B., 2009a. The effects of thunderstorm-generated atmospheric gravity waves on mid-latitude F-region drifts. *J. Atmospheric Solar-Terrestrial Phys.* 71, 1904–1915. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.07.006>
- [36] S.L. Vadas, DC. Fritts, Thermospheric responses to gravity waves arising from mesoscale convective complexes, *J. Atmospheric Solar-Terrestrial Phys.* 66 (2004) 781–804, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.01.025>.
- [37] N.V. Isaev, V.M. Sorokin, O.N. Serebryakova, G.A. Stanev, A.K. Yaschenko, E.P. Trushkina, Electric field enhancement and disturbances of plasma density in the ionosphere above the zones of preparation and development of typhoons, Second scientific conference with international participation, Space, Ecology, Nanotechnology, Safety, Varna, Bulgaria (2006).
- [38] A. Dube, S. Kumar, R. Singh, A.K. Singh, Ionospheric perturbations induced by a Very Severe Cyclonic Storm: a case study of Phailin VSCS, *J. Geophys. Res. Space Physics (AGU)* 125 (2020) e2019JA027197.
- [39] Z. Yang, Z. Liu, Observational study of ionospheric irregularities and GPS scintillations associated with the 2012 tropical cyclone Tembin passing Hong Kong, *J. Geophys. Res. Space Phys.* 121 (2016) 4705–4717.