

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2025-43-02>

УДК 550.388

Л. Ф. ЧОРНОГОР, д. ф.-м. наук, проф., чл.-кор. НАН України

e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

М. Ю. ТКАЧЕНКО, аспірант, м. н. с.

e-mail: tkachenko.postgrad@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-5362-8112>

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

АНАЛІЗ ЗБУРЕНЬ В ВИСОКОШИРОТНІЙ ІОНОСФЕРІ ПІД ЧАС БАГАТОКРОКОВОЇ МАГНІТНОЇ БУРІ 4–5 ЛИСТОПАДА 2023 РОКУ ЗА ДАНИМИ РАДАРУ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ

Актуальність. Іоносфера є ключовим радіоканалом для здійснення сеансів радіозв'язку, навігації, радіолокації, дистанційного зондування та радіоастрономії. Її стан визначає якість роботи наземних і космічних технологічних систем. Найпотужніші збурення параметрів іоносфери спричиняють сонячні бурі. Як наслідок, може порушуватися або унеможлилюватися проведення сеансів радіозв'язку, розв'язання завдань радіонавігації, радіолокації та радіозондування навколоземного та дальнього космічного простору. Найбільш чутлива до таких впливів високоширотна іоносфера (понад $\pm 60^\circ$), де одночасно проявляються магнітосферна конвекція, посилення струмів, джоулевий нагрів і висипання енергійних частинок. Радар некогерентного розсіяння дає змогу вивчати часову й просторову динаміку ключових параметрів іоносфери — температур електронів та іонів, електронної концентрації, плазмових швидкостей і іонного складу. Оскільки зміни стану іоносферного каналу можуть спричинити збої або унеможлилювати проведення сеансу радіозв'язку, роботи пристроїв радіонавігації та позиціонування за допомогою супутникових систем навігації, комплексне дослідження таких збурень є актуальним.

Метою роботи є дослідження за допомогою радару некогерентного розсіяння особливостей збурень у високоширотній іоносфері, що супроводжували унікальну багатокрокову геомагнітну бурю.

Методи і методологія. За даними вимірювань радару некогерентного розсіяння Poker Flat (Аляска, США) протягом багатокрокової магнітної бурі 4-5 листопада 2023 року проведено дослідження та встановлення параметрів збурень високоширотної іоносфери у північній півкулі.

Результати. Встановлено, що найбільші збурення спостерігалися в ніч 4-5 листопада та в другій половині 5 листопада та супроводжувалися екстремальними значеннями T_i до $(5-6) \cdot 10^3$ К, великими швидкостями $E \times B$ дрейфу (>500 м/с), локальними збуреннями T_e та падінням O^+/N_2 . Ефекти якісної зміни хімічного складу іоносферної плазми та термосфери (зміна розподілу по висоті значень відношення O^+/N_2 та висоти рівня біля 0,5) відіграли ключову роль у формуванні негативної фази іоносферної бурі, особливо 5–6 листопада, коли N_e залишалася заниженою при підвищених температурах і збереженні конвекції. Відновлення після цих збурень зайняло щонайменше дві доби: спочатку відновилася концентрація електронів (22:00 6 листопада – 8:00 8 листопада), потім повернулися до фонових значень температури електронів і іонів, швидкості дрейфу плазми, тоді як посилені конвективні процеси на висотах більших 360 км зберігалися до кінця періоду спостережень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: іоносфера, магнітна буря, некогерентне розсіяння, іоносферні збурення, особливості реакції іоносфери.

Як цитувати: Черногор ЛФ, Ткаченко МЮ. Аналіз збурень в високоширотній іоносфері під час багатокрокової магнітної бурі 4-5 листопада 2023 року за даними радару некогерентного розсіяння. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2025;43:20-33. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2025-43-02>

In cites: Chernogor LF., Tkachenko MYu. Analysis of disturbances in the high-latitude ionosphere during a multi-step magnetic storm on November 4-5, 2023 based on incoherent scattering radar data. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Radiophysics and Electronics. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2025-43-02>

ВСТУП

Іоносфера є ключовим середовищем для радіозв'язку, навігації, радіолокації, дистанційного зондування й радіоастрономії [1,2]. Її стан визначається процесами в системі Сонце-міжпланетне середовище-магнітосфера-іоносфера-атмосфера-Земля (СМСМАЗ) [3] та найбільшою мірою залежить від сонячної активності — потоків сонячного вітру, спалахів, космічних променів і корональних викидів [4–6].

Збурення іоносфери мають важливе прикладне значення, оскільки впливають на роботу наземних і космічних систем. Магнітна буря, породжена досліджуваною геокозмичною бурєю, в роботі [7] була класифікована як дві послідовні бурі категорії G2 та G3, відповідно, тобто помірна та сильна. Магнітні бурі цього класу здатні викликати полярні сніжки навіть у середніх широтах (включно до 50°). Виникають сильні радіозавади та шуми в різних діапазонах частот, що значно погіршує якість функціонування радіосистем різного призначення, зокрема, систем глобального позиціонування. Індукуються значні струми в магістральних трубопроводах і в лініях електропередач, що потребує виконання коригуючих заходів [8].

Високоширотна іоносфера (субавроральна ($\pm 50\text{--}55$ або $65\text{--}70^\circ$ пн./пд. широти), авроральна ($\pm 65\text{--}75^\circ$ пн./пд. широти) та полярна ($\geq \pm 75^\circ$ пн./пд. широти) надзвичайно нестабільні. Її головні параметри, такі як концентрація та температури електронів і іонів, критична частота шару F2, її якісний та кількісний іонний склад постійно змінюються в широкому діапазоні значень (рази і, навіть, на порядки величин). Причинами цих варіацій є, головним чином, висипання енергійних частинок з магнітосфери та магнітосферна конвекція, яка, зокрема, зумовлює утворення головного іоносферного провалу, зміну положення його меж, ширини та глибини [9–16], утворення та характеристики аврорального та полярного гребенів, а також полярного провалу. Додатково хід процесів в високоширотній іоносфері ускладнюється наявністю довготної асиметрії в широтному розподілі її параметрів, що виникає в наслідок неспівпадіння геомагнітного та географічного полюсів, через що виникає сильна залежність процесів в іоносфері від світового часу [17]. Також суттєвими є ефекти, пов'язані з повздовжніми струмами. Під час магнітних бурь і за виникнення суббурь поєднання синхронної дії багатьох чинників і значне зростання енергетики процесів не лише в іоносфері, а і в інших підсистемах системи СМСМІАЗ призводить до виникнення таких ефектів, як підсилене поглинання аж до блекауту радіохвиль в полярних шапках, росту величин іоносферних сцинтиляцій [18, 19]. Загальна картина процесів, що протікають у підсистемах та, зокрема, у високоширотній іоносфері, а також їхній вплив на системи радіокомунікацій і поширення радіохвиль наведено у роботах [20–24].

Геокозмичні бурі спричиняють значні варіації параметрів усіх підсистем системи СМСМІАЗ і всіх геофізичних полів, що негативно позначається на роботі наземних систем і космічних апаратів [25–28]. Такі збурення змінюють параметри іоносфери в широкому діапазоні широт [29, 30] і на всіх висотах [31, 32] та, зокрема, супроводжуються генерацією АГХ [33–40]. Так як кожна геокозмична буря є унікальною в своєму роді за поєднанням характеру та енергетики чинників, що прямо чи опосередковано впливають на стан іоносфери (в тому числі високоширотної), всебічне дослідження процесів, що протікають в іоносфері, є актуальною задачею. Поглиблення знань про іоносферу та її реакцію на дію високоенергетичних джерел дозволить створити більш надійні пристрої та алгоритми для розв'язання задач радіозв'язку, радіонавігації та радіоастрономії. Регіональні дослідження дають змогу створювати точні моделі іоносфери й коригувати роботу радіотехнічних комплексів.

Метою роботи є дослідження за допомогою радара некогерентного розсіяння особливостей збурень у високоширотній іоносфері, що супроводжували унікальну багатокрокову геомагнітну бурю.

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Згідно з даними сайтів [41] і [42] та наших обчислень стан космічної погоди був наступний. До полудня 4 листопада концентрація частинок сонячного вітру залишалася нижче $5 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$. В другій половині доби 4 листопада вона зросла до $50 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$ та $42 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$ 5 листопада відповідно.

До 5 листопада температура частинок сонячного вітру становила $\sim 10^5 \text{ К}$; у період з 5 по 8 листопада вона сильно варіювалася, досягаючи пікового за період спостережень значення, яке склало $5,1 \times 10^6 \text{ К}$

6 листопада.

Швидкість сонячного вітру коливалася близько 400 км/с 4 листопада, підвищуючись після 08:00 (тут і надалі UTC) до 735 км/с і залишаючись підвищеною до 8 листопада.

Обчислений динамічний тиск сонячного вітру на магнітосферу у середньому становив $\sim 1 \text{ нПа}$ за магнітоспокійних умов до 18:00 4 листопада, але різко зріс, досягаючи величин 11 та 16 нПа 4 та 5 листопада відповідно. Біля опівночі в ніч з 5 на 6 листопада значення тиску спали, повернувшись до величин, характерних для магнітоспокійних днів 2 та 3 листопада, і залишалися нижче 5 нПа до 8 листопада.

Компоненти міжпланетного магнітного поля були мали величини $< 1 \text{ нТл}$ до другої половини доби 4 листопада, досягнувши пікових значень $B_y = -31,8 \text{ нТл}$ та $B_z = -23,5 \text{ нТл}$ близько 12:00 5 листопада.

Величина обчисленого параметра Акасофу ϵ_d зросла з 0,1–0,15 ТДж/с, що спостерігалися приблизно до 18:00 4 листопада, до максимуму 15 ТДж/с 5 листопада.

Індекс K_p залишався на рівні $< 2+$ до другої половини 4 листопада, після чого збільшився до 5 о 18:00 UT. Близько 09:00 UT 5 листопада спостерігалось зменшення до величини 2-, але потім досяг піку 8- о 15:00. Між 5 і 7 листопада він коливався близько величини 4+, згодом зменшившись до значень 3+ – 4- до кінця періоду спостережень 8 листопада.

Індекс Dst коливався в межах $\pm(11-15)$ нТл до початку 4 листопада, потім ненадовго піднявся до 14 нТл (12:00–16:00), що свідчить про початок магнітної бурі, перш ніж впасти до -62 нТл близько 23:00. Подальше різке зниження з -50 до -172 нТл відбулося між 14:00 та 16:00 5 листопада. Після 22:00 5 листопада почалося поступове відновлення величин індекса до значень, що спостерігались протягом магнітоспокійних днів 2 та 3 листопада, з незначними варіаціями та тривало до 8 листопада.

МЕТОДИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ

Для проведення досліджень було використано дані вимірювань [43], зібрані за допомогою радару некогерентного розсіяння Poker Flat (США, Аляска, 65.13 пн. ш., 147.47 сх. д.). Детальну інформацію про сам радар можна отримати в роботах [44, 45] та на сайтах бази даних Madrigal та AMISR [46]. Діапазон частот випромінювання радару складає 449–450 МГц, робота велась в імпульсному режимі з тривалістю імпульсу 330 мс. Геометрія трас протягом вимірювань в період з 2 по 8 листопада показана на Рис. 1.

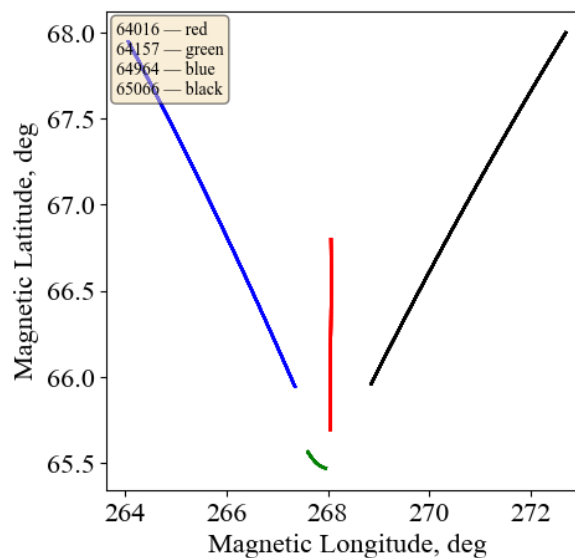


Рис. 1. Просторова геометрія трас зондування в період з 2 по 8 листопада 2023 року

Fig. 1. Spatial geometry of sounding paths during the period from November 2 to 8, 2023

Враховуючи незначні відстані між точками вимірювань з урахуванням геометрії трас, без втрати репрезентативності для аналізу обрано одну трасу, а саме 64016. Додаткову інформацію та метадані про експеримент і інструменти також можна отримати на сайті SRI ISR Database [47].

Отримані дані пройшли попередню обробку, включаючи операцію віконного усереднення. Ширина вікна складала 15 хвилин, що забезпечує можливість аналізу великомасштабних рухомих іоносферних збурень, період хвилових процесів яких складає 30–180 хв.

Детальний опис методології проведення досліджень іоносфери за даними некогерентного розсіювання взагалі приведено в монографії [48].

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Нижче на Рис. 2–7 представлені результати експериментальних вимірювань за 2–7 листопада 2023 року.

Результати вимірювань параметрів іоносфери для проміжку часу з 13:00 2 листопада по 08:00 3 листопада представлено на Рис. 2. На верхній панелі наведено залежність концентрації електронів від часу та висоти. В період з 20:00 2 листопада і до 03:00 3 листопада спостерігається підвищення значень

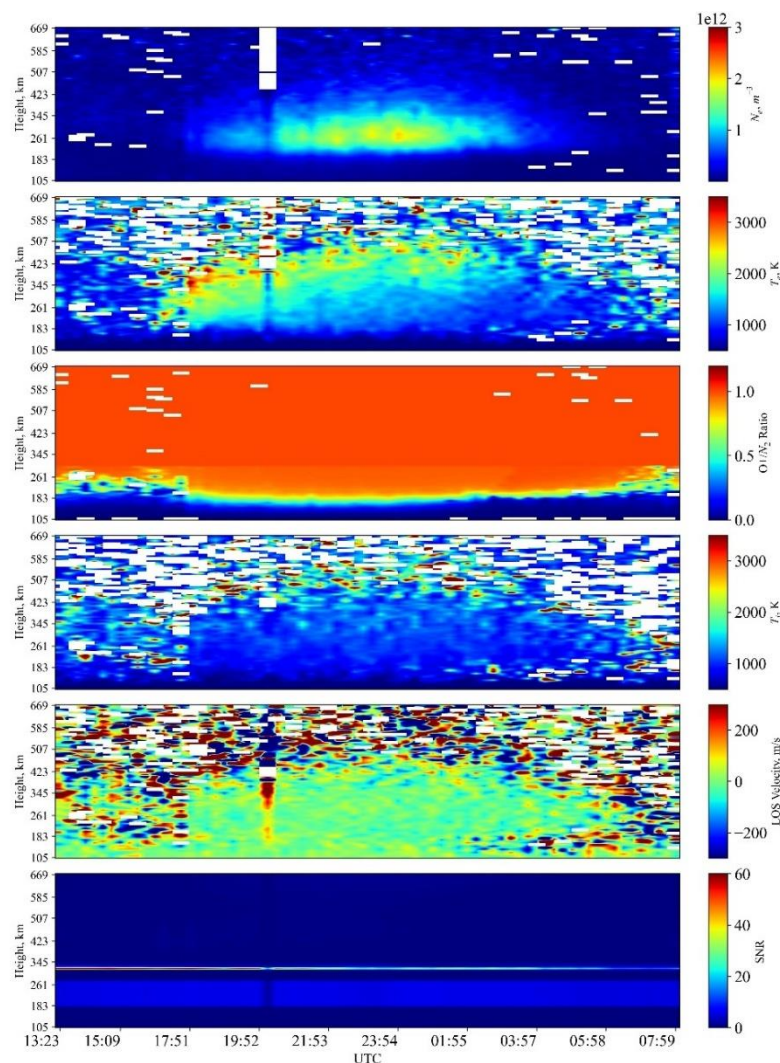


Рис.2. Результати вимірювань параметрів іоносфери протягом доби 2 листопада 2023 року: концентрації електронів N_e , температури електронів T_e , відношення O^+/N_2 , температури іонів T_i , радіальної швидкості дрейфу плазми LOS (Line of Sight) Velocity, відношення сигнал/шум SNR

Fig.2. Results of measurements of ionospheric parameters during the day on November 2, 2023: electron concentration N_e , electron temperature T_e , O^+/N_2 ratio, T_i ion temperature, plasma drift velocity LOS (Line of Sight) Velocity, signal-to-noise ratio SNR

концентрації електронів на висотах 200-350 км зі значеннями концентрацій електронів в діапазоні значень $(1.2-2.1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ з максимумом на висотах 210-300 км. На висотно-часовій залежності температури електронів в той же проміжок часу спостерігається область підвищених значень температури в діапазоні висот від 180 до 450 км, причому максимум температури поступово зміщується протягом вказаного проміжку часу вгору від висот близько 250 до 420 км. Розмах величин температури електронів в цій області складає 1700-2800 К. Як видно з часо-висотної залежності, до 17:30 висота, на якій спостерігаються значення відношення O/N_2 близько 0.5, складала 210-240 км, однак близько 18:00 ця висота зменшилась до 180-190 км, повернувшись до початкових значень приблизно о 06:00 3 листопада. На панелі, де представлено часо-висотну залежність температури іонів в проміжку часу між 17:30 2 листопада та 06:00 3 листопада спостерігається обширна область знижених температур іонів (1000-1600 К) на висотах 150-423 км, що контрастує з областями на більших висотах, що мали температуру 2000-3000 К. В той же проміжок часу схожу за ходом по висоті і часу залежність виявляє і швидкість дрейфу плазми вздовж радіотраси, де спостерігаються швидкості в діапазоні -20 – 90 м/с, в той час як поза цією областю спостерігаються швидкості дрейфу більше 130 м/с. За даними на панелі, на якій зображено відношення сигнал/шум, можна зробити висновок, що результати вимірювань достовірні.

Нижче на Рис.3 зображено результати вимірювань в проміжок часу з 10:20 по 18:20 протягом доби 3 листопада.

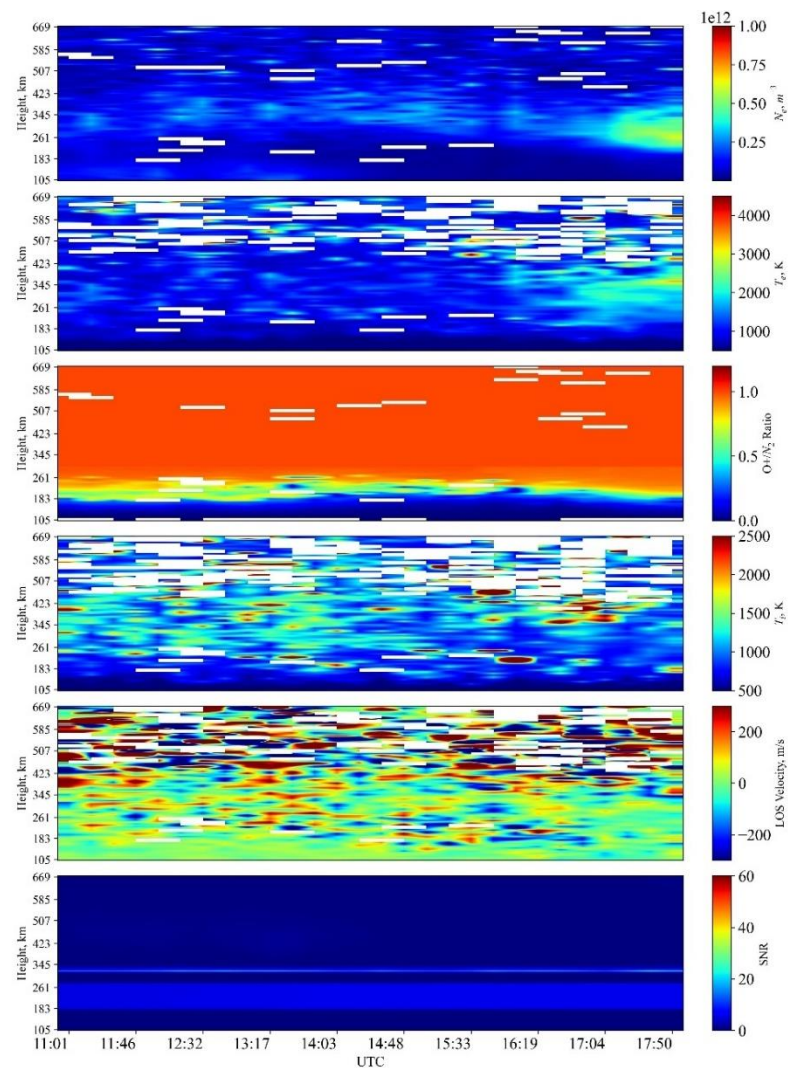


Рис.3. Результати вимірювань параметрів іоносфери протягом доби 3 листопада 2023 року: концентрація електронів N_e , температура електронів T_e , відношення O^+/N_2 , температура іонів T_i , швидкості дрейфу плазми LOS (Line of Sight) Velocity, відношення сигнал/шум SNR

Fig.3. Results of measurements of ionospheric parameters during the day on November 3, 2023: electron concentration N_e , electron temperature T_e , O^+/N_2 ratio, T_i ion temperature, plasma drift velocity LOS (Line of Sight) Velocity, signal-to-noise ratio SNR

Аналізуючи висотно-часові залежності представлених параметрів можна відмітити наступні особливості. В цілому порівняно з температурами електронів протягом попереднього періоду вимірювань концентрації електронів значно зменшилися і лежать в діапазоні $(0.25-0.7) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Протягом проміжку часу між 11:00 та 17:00 максимум концентрацій знаходився на висоті 310–340 км і складав $(0.3-0.4) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Наприкінці інтервалу вимірювань в період з 17:20 по 18:00 спостерігається яскраво виражене уширення області підвищених до $(0.5-0.7) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ значень концентрації електронів на висотах 180–320 км. Аналогічна висотно-часова динаміка спостерігається і для залежності температури електронів: до 16:30 спостерігалися значення температур в інтервалі 1200–1800 К в усьому діапазоні висот, після чого спостерігається зростання температури електронів на висотах 190–350 км до величин 2000–3100 К. Лінія, на якій значення відношення O/N_2 складає приблизно 0.5 протягом всього інтервалу спостережень, знаходилась в діапазоні висот 180–220 км. Температури іонів і швидкості дрейфу плазми вздовж радіотраси дещо зменшилися відносно величин, що спостерігалися протягом попереднього інтервалу вимірювань. Температури іонів в проміжку часу з 10:30 до 16:00 знаходились в інтервалі значень 1200–1500 К в усьому діапазоні висот. Після 16:00 спостерігаються локалізовані в просторі та часі сплески температури іонів зі значеннями в інтервалі 2100–2500 К на висотах близько 190 км, а також в діапазоні висот 340–450 км. Швидкості дрейфу плазми протягом всього інтервалу вимірювань на висотах 105–340 км складала

10–120 м/с, а на більших висотах – 200 м/с і вище. Згідно з даними про відношення сигнал-шум можна сказати, що дані достовірні.

На Рис.4 зображено результати вимірювань протягом проміжку часу між 00:00 4 листопада та 08:00 5 листопада.

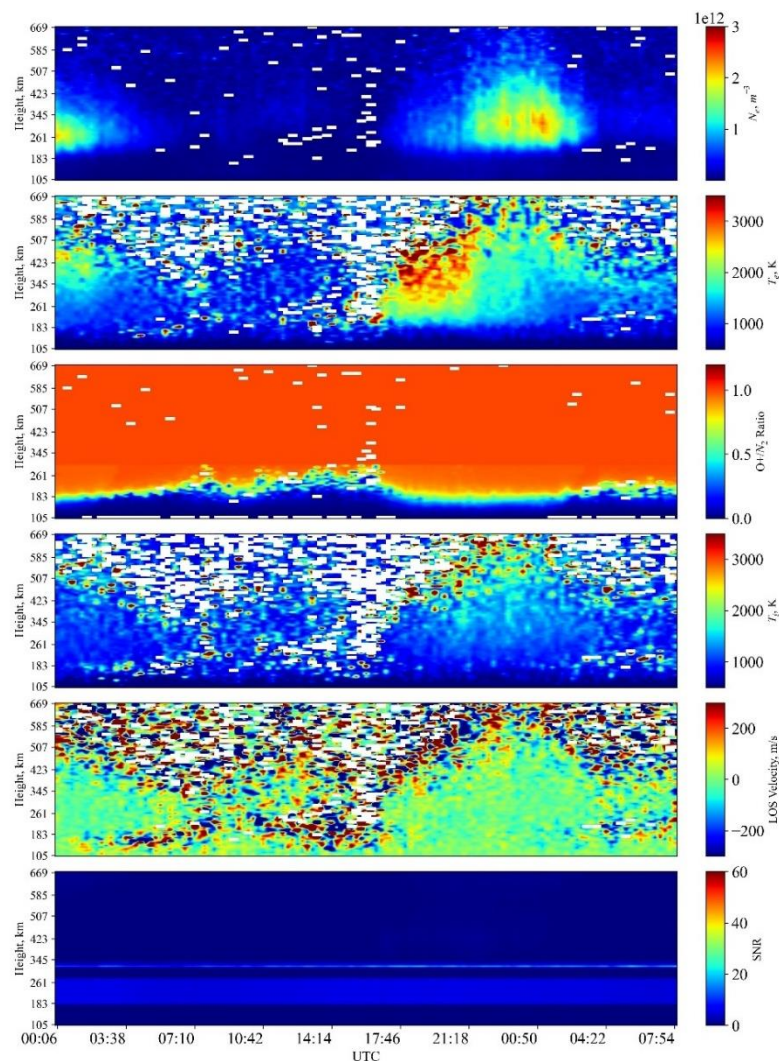


Рис.4. Результати вимірювань параметрів іоносфери протягом доби 4 листопада 2023 року: концентрація електронів N_e , температура електронів T_e , відношення O^+/N_2 , температура іонів T_i , швидкості дрейфу плазми LOS (Line of Sight) Velocity, відношення сигнал/шум SNR

Fig.4. Results of measurements of ionospheric parameters during the day on November 4, 2023: electron concentration N_e , electron temperature T_e , O^+/N_2 ratio, T_i ion temperature, plasma drift velocity LOS (Line of Sight) Velocity, signal-to-noise ratio SNR

Протягом цього інтервалу вимірювань можна виділити наступні особливості. На панелі, яка демонструє висотно-часову залежність концентрації електронів, спостерігається дві області підвищених значень: в діапазоні висот 200–300 км в період часу з 00:00 4 по 03:30 4 листопада з величинами концентрації в діапазоні $(1.3–1.9) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$; в діапазоні висот 200–420 км в період часу з 21:10 4 листопада по 04:00 5 листопада з величинами концентрації в діапазоні $(1.2–2.2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Синхронно з першою подією в діапазоні висот 300–450 км має місце область підвищеної температури електронів (1700–2400 К). Також спостерігається область підвищеної температури електронів в проміжок часу з 17:00 4 листопада по 01:00 5 листопада. Діапазон температур електронів в цей проміжок часу складав 2000–3400 К з максимальними значеннями на висотах 270–450 км. В цей час на проміжку часу з 00:00 по 05:30 висота, на якій значення відношення O^+/N_2 дорівнювало 0.5, складала 180–210 км, з 07:00 по 14:20 – 230–250 км, з 17:30 по 02:00 5 листопада – 160–180 км, а з 04:00 по 08:00 к листопада – 230–250 км. На висотно-часових залежностях температури іонів і швидкості дрейфу плазми синхронно до змін значень відношення O^+/N_2 спостерігаються

дві області відносно знижених температур і швидкостей: 1000–1500 К та ± 40 м/с в діапазоні висот 180–420 км в проміжок часу з 00:00 по 07:20; 1200–1600 К та ± 50 м/с, відповідно, в діапазоні висот 190–400 км. Також в період часу з 00:00 по 07:20 на висотах 420–590 км спостерігається область підвищеної температури іонів – 2700–3400 К. Згідно значень SNR за даний інтервал вимірювань, дані є достовірними.

Нижче на Рис.5 представлено результати вимірювань в період з 16:00 по 23:10 5 листопада.

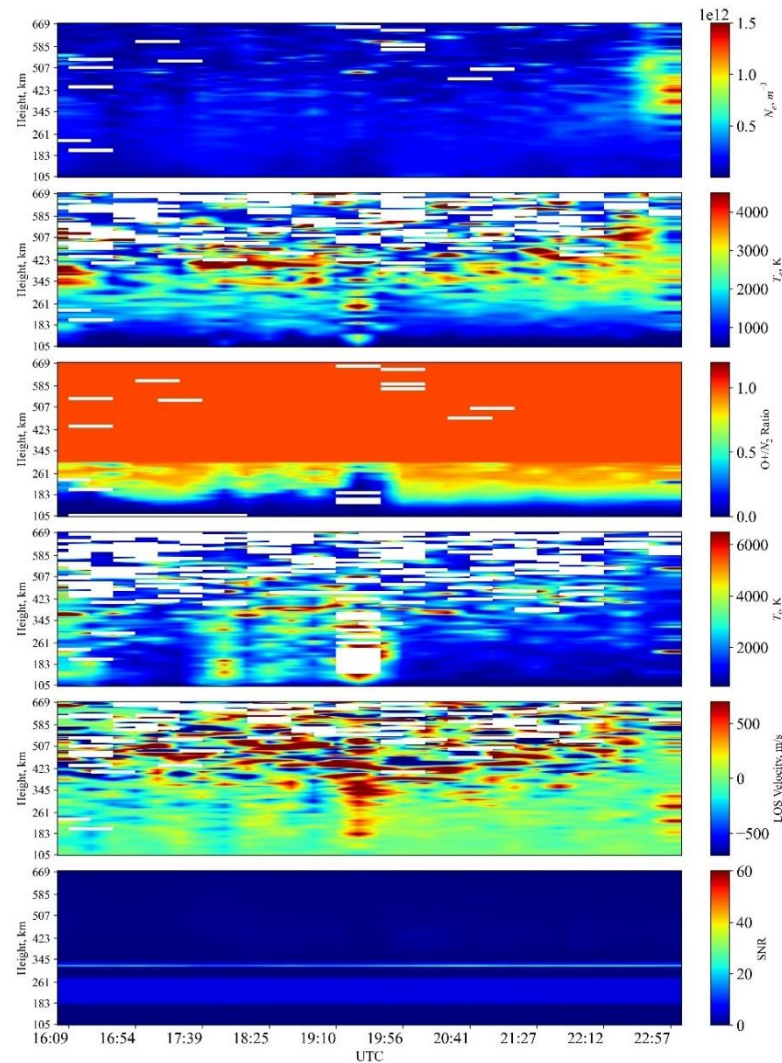


Рис.5. Результати вимірювань параметрів іоносфери протягом доби 5 листопада 2023 року: концентрація електронів N_e , температура електронів T_e , відношення O^+/N_2 , температура іонів T_i , швидкості дрейфу плазми LOS (Line of Sight) Velocity, відношення сигнал/шум SNR

Fig.5. Results of measurements of ionospheric parameters during the day on November 5, 2023: electron concentration N_e , electron temperature T_e , O^+/N_2 ratio, T_i ion temperature, plasma drift velocity LOS (Line of Sight) Velocity, signal-to-noise ratio SNR

В період з 16:00 по 22:30 концентрація електронів в усьому діапазоні висот складала $(0.3\text{--}0.45) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. З 22:30 по 23:10 її значення на висотах 280–420 км склали $(0.7\text{--}1.5) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ з максимумом на висоті 260–310 км. Температура електронів протягом цього інтервалу вимірювань на висотах 105–330 км складала 1600–2300 К, а на висотах 330–600 км – 2700–4200 К. Близько 19:10 на висотах 210–260 км спостерігається локалізована область підвищеної температури електронів з максимальними значеннями 3800–4300 К. Величина відношення O^+/N_2 в діапазоні висот 180–290 км на проміжку часу з 16:30 по 18:40 складала 0.7–0.8; аналогічні значення на тих же висотах спостерігаються на проміжку часу з 19:40 по 23:10. Відмічається також локалізована в часі і просторі область зниженого значення відношення $(0.1\text{--}0.35)$ близько 19:10. На висотно-часовій залежності температури іонів протягом даного періоду вимірювань можна відмітити три характерні проміжки часу: з 16:00 по 16:50, з 17:30 по 20:00 та з 20:00 по 23:10. Протягом першого проміжку на висотах 110–450 км має місце температури іонів 2800–5500 К.

Протягом другого проміжку на висотах 110–450 км температури іонів сягали 3100–5600 К. Протягом третього проміжку часу на висотах 110–340 км температури іонів склали 1500–2600 К, а на висотах 340–530 км – 3300–5000 К. На висотно-часовій залежності швидкості дрейфу плазми спостерігається картина, схожа на таку для висотно-часової залежності температури електронів протягом цього інтервалу вимірювань: на висотах 340–630 км швидкості дрейфу плазми склали $\pm(400\text{--}550)$ м/с, а близько 19:10 в діапазоні висот 110–330 км спостерігається локалізована в часі та просторі область зі швидкостями дрейфу плазми в діапазоні 270–530 м/с. Згідно висотно-часової залежності SNR дані є достовірними.

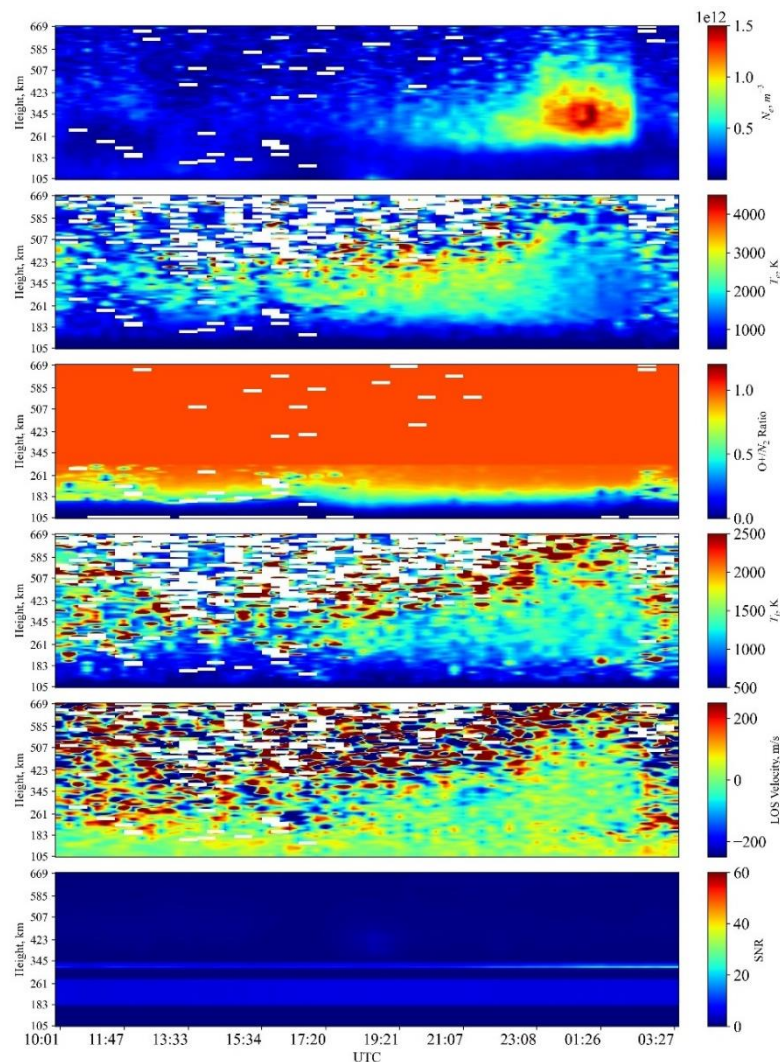


Рис.6. Результати вимірювань параметрів іоносфери протягом доби 6 листопада 2023 року: концентрація електронів N_e , температура електронів T_e , відношення O^+/N_2 , температура іонів T_i , швидкості дрейфу плазми LOS (Line of Sight) Velocity, відношення сигнал/шум SNR

Fig.6. Results of measurements of ionospheric parameters during the day on November 6, 2023: electron concentration N_e , electron temperature T_e , O^+/N_2 ratio, T_i ion temperature, plasma drift velocity LOS (Line of Sight) Velocity, signal-to-noise ratio SNR

На Рис.6 представлено результати вимірювань протягом інтервалу часу з 10:00 6 листопада по 03:30 7 листопада. При цьому можна відмітити наступні особливості часо-висотних залежностей параметрів іоносфери. На часо-висотній залежності температури електронів з 10:00 по 22:00 6 листопада спостерігаються три області зниженої концентрації електронів: з 10:00 по 11:30 в діапазоні висот 120–270 км зі значеннями концентрації $(0.2\text{--}0.3)\cdot 10^{12}$ м⁻³; з 11:30 по 15:20 в діапазоні висот 340–660 км зі значеннями концентрації $(0.2\text{--}0.3)\cdot 10^{12}$ м⁻³; з 15:20 по 17:30 в діапазоні висот 105–220 км зі значеннями концентрації $(0.2\text{--}0.3)\cdot 10^{12}$ м⁻³. Також в період з 22:00 6 листопада по 02:00 7 листопада можна відмітити область підвищених значень концентрації електронів – $(0.7\text{--}1.5)\cdot 10^{12}$ м⁻³ – в діапазоні висот 180–420 км з максимумом на висоті близько 310 км. На висотно-часовій залежності температури електронів відмічається

область підвищених значень (2500–3800 K) на проміжку часу з 10:00 по 23:10 в діапазоні висот 180–500 км з максимумами на висотах 340–500 км. На висотно-часовій залежності відношення O/N_2 спостерігаються широка полоса висот (150–250 км) зі значеннями цього відношення в інтервалі 0.5–0.7. Висотно-часові залежності температури іонів та швидкості дрейфу плазми мають схожі особливості. На проміжку часу з 10:00 по 23:00 в діапазоні висот 260–660 км мають місце підвищені значення температур іонів (1500–2500 K) та швидкостей (± 250 м/с). В проміжку часу між 23:10 6 листопада та 02:40 7 листопада спостерігається область відносно знижених температур іонів (1200–1400 K) та швидкостей дрейфу плазми (± 50 м/с). Згідно часо-висотної залежності SNR дані є достовірними.

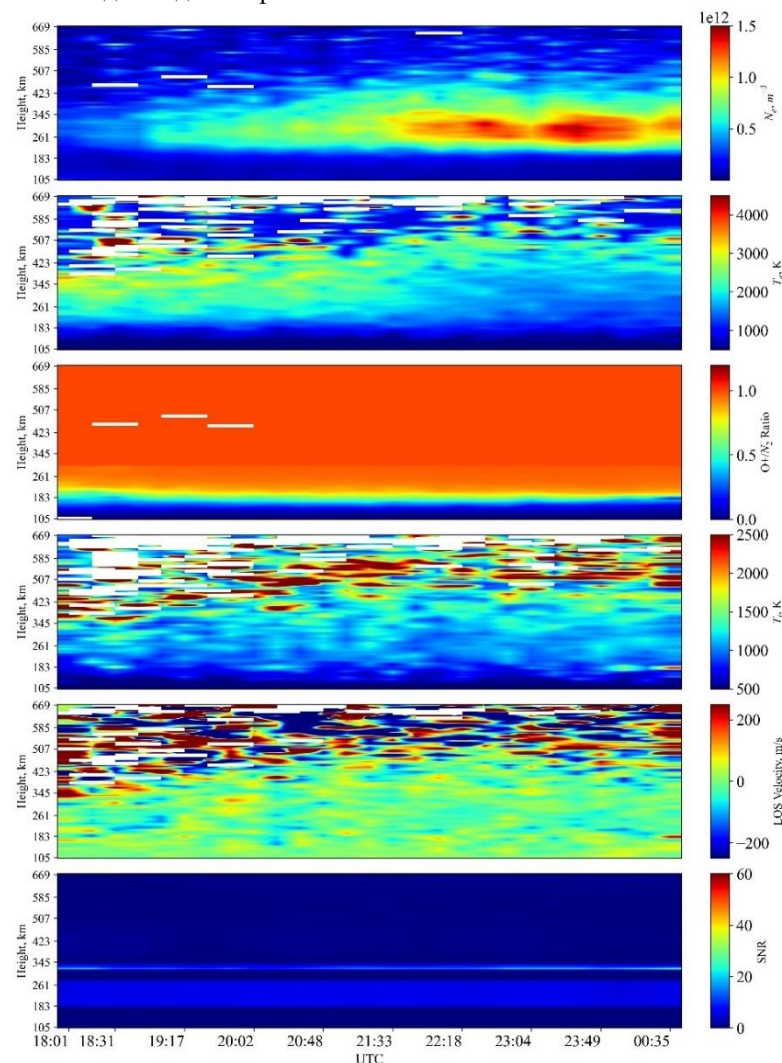


Рис.7. Результати вимірювань параметрів іоносфери протягом доби 7 листопада 2023 року: концентрація електронів N_e , температура електронів T_e , відношення O^+/N_2 , температура іонів T_i , швидкості дрейфу плазми LOS (Line of Sight) Velocity, відношення сигнал/шум SNR

Fig.7. Results of measurements of ionospheric parameters during the day on November 7, 2023: electron concentration N_e , electron temperature T_e , O^+/N_2 ratio, T_i ion temperature, plasma drift velocity LOS (Line of Sight) Velocity, signal-to-noise ratio SNR

Результати вимірювань протягом проміжку часу з 18:00 7 листопада по 00:50 8 листопада представлено на Рис.7. На висотно-часовій залежності концентрації електронів відмічалася протяжна область підвищених значень $(0.7-1.4) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ в діапазоні висот 180–400 км в період з 19:00 7 листопада по 00:50 8 листопада. Максимум концентрації електронів спостерігався на висотах 200–280 км на проміжку часу з 23:30 7 листопада по 00:50 8 листопада. На проміжку часу з 18:00 по 22:00 7 листопада температура електронів в діапазоні висот 180–510 км складала 2500–3700 K з максимумами на висотах 330–450 км. Після чого до 00:50 8 листопада на висотах 180–330 км мали місце зниження температури електронів до величин 1700–2000 K, а на висотах 360–470 км спостерігалися значення температур електронів в діапазоні 2500–3600 K. Протягом всього інтарвалу вимірювань на висотах 180–230 км реєструвалися значення

відношення O/N_2 в діапазоні 0.5–0.7. Температури іонів і швидкості дрейфу плазми знову виявляють схожу поведінку: протягом всього інтервалу вимірювань на висотах 105–350 км спостерігалися значення температур іонів в діапазоні 1000–1400 К та швидкостей ± 60 м/с; на висотах вище 350 км та вище величини параметрів складала 1600–2500 К та ± 250 м/с відповідно. Згідно висотно-часової залежності SNR дані є достовірними.

ОБГОВОРЕННЯ

2–3 листопада за даними параметрів космічної погоди відповідають магніто-спокійним і слабо збуреним умовам ($n \approx (3-5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, $p \approx 1$ нПа, $|Bz| \lesssim 1$ нТл, $Kp < 2$). У цей час за даними вимірювань радару спостерігається типова поведінка високоширотної F-області іоносфери. Вночі з 2 на 3 листопада формується чітко виражений максимум N_e на висотах $\sim 200-350$ км із значеннями концентрації в діапазоні $(1-2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Це відповідає стандартному нічному накопиченню плазми F2-шарі при помірній високоширотній конвекції. Одночасно спостерігається помірне підвищення T_e на висотах 180–450 км і плавний підйом максимуму T_e з ~ 250 до ~ 400 км до ранку. Висота рівня $O^+/N_2 \approx 0,5$ коливається у вузькому інтервалі ($\sim 180-240$ км) без різких стрибків. Це свідчить, що склад термосфери залишається близьким до квазістаціонарного, без потужних сплесків молекулярного збагачення. В проміжок часу з 17:30 по 06:00 фіксується область знижених T_i ($\sim 1000-1600$ К) та швидкостей дрейфу плазми ($\sim 20-90$ м/с) на висотах 150–400 км при підвищених T_i на висотах $z > 400$ км. Таке поєднання типове для помірної конвекції, коли основна джоулева дисипація і тертя з нейтралами зміщені у вищі шари, а в середній частині F-області переважають процеси теплопровідності та охолодження. Згідно даних вимірювань відношення сигнал/шум, виявлені структури є реальними, а не артефактами обробки.

Таким чином, 2–3 листопада можна вважати репрезентативним «фоновим» режимом високоширотної іоносфери, на тлі якого потім виявляється відповідь на багатоступеневу бурю.

Згідно з оглядом космічної погоди, 4 листопада починається перша стадія геомагнітної бурі категорії G2: зростає швидкість і густина сонячного вітру, динамічний тиск досягає ~ 11 нПа, Kp підвищується до 5, Dst падає до ~ -60 нТл. В інтервалі 00:00–03:30 4 листопада зберігається підвищена N_e ($\sim (1,3-1,9) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$) на висотах 200–300 км та помірне збільшення T_e (до ~ 2400 К) на висотах 300–450 км. Висота рівня $O^+/N_2 \approx 0,5$ складає $\sim 180-210$ км, тобто дещо нижча, ніж у спокійну добу, проте без різкого провалу. У F-області (180–400 км) зберігаються відносно низькі значення T_i і швидкості дрейфу, тоді як на висотах $z > 400$ км T_i помітно вище.

Таке поєднання говорить про те, що конвективні процеси, що спостерігалися протягом 2–3 листопада вже призводять до додаткового нагріву іоносферної плазми у верхній частині F-області, але поки що не супроводжуються сильною перебудовою складу або потужною конвекцією в середній частині шару.

Вечір та ніч з 4 на 5 листопада (21:10–04:00) за часом збігається з посиленням Kp до 5 та початком падіння Dst . На висотах 200–420 км формується широка область підвищених значень N_e ($\sim (1,2-2,2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$) та T_e ($\sim 2000-3400$ К). Висота рівня $O^+/N_2 \approx 0,5$ знижується до 160–180 км, що свідчить про проникнення в область F-шару нейтралів з підвищеним вмістом молекулярних компонентів і, відповідно, збільшення швидкості хімічної рекомбінації. При цьому на висотах 180–400 км фіксуються відносно низькі T_i ($\sim 1200-1600$ К) та швидкості дрейфу $v \lesssim 50$ м/с, тоді як у верхній частині профілю (420–590 км) T_i досягає 2700–3400 К. Така вертикальна структура (підвищені N_e та T_e , знижені T_i та швидкості у F-області) вказує на конкуренцію наступних двох механізмів: посилена конвекція та енергетичний внесок в авроральній зоні, що призводять до підйому та нагріву плазми у верхній частині F-області; збурення хімічного складу (молекулярно збагачене повітря), що виявляються через зниження висоти рівня $O^+/N_2 \approx 0,5$ та тенденцію до охолодження та гальмування іонів на висотах 180–400 км.

Іншими словами, в кінці 4 і в ніч на 5 листопада реалізується перехідний режим від позитивної до негативної фази відгуку високоширотної іоносфери.

За даними OMNI, близько 14–16 5 листопада на Землю приходить другий удар: Bz досягає $-23,5$ нТл, ϵ_d зростає до ~ 15 ТДж/с, Kp піднімається до 8-, Dst падає до -172 нТл.

Інтервал 16:00–23:10 5 листопада у даних радару добре ілюструє основну фазу другого кроку цієї бурі. Спостерігаються сильний джоулів нагрівання та конвекція. На висотах 110–450 км T_i досягає $(3-5,5) \cdot 10^3$ К, а на висотах 340–630 км швидкості дрейфу складають 400–550 м/с. Такі величини типові для інтенсивного джоулевого нагріву та $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$. Високі T_i та великі швидкості зберігаються значну частину інтервалу (особливо 17:30–20:00), що говорить про тривалий, а не імпульсний характер інжекції енергії в іоносферу. Близько 19:10 на висотах 210–260 км спостерігається локальний максимум T_e ($\sim 3800-4300$ К), одночасно T_i у цій області залишається на рівні $(3-5) \cdot 10^3$ К, швидкості дрейфу досягають 270–530 м/с, відношення O^+/N_2 падає

до 0.1–0.35. Часова і висотна локалізація цих екстремальних значень, їхній збіг за параметрами (T_e , T_i , швидкості дрейфу, O^+/N_2) вказують на проходження через трасу радара інтенсивної авроральної структури (дуги або яскравої ділянки овалу), що супроводжується сильним енерговнеском за рахунок осадження енергійних частинок у F-області іоносфери. При такому сильному нагріві та конвекції N_e в основному залишається помірно ($\approx(0,3-0,45)\cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$), що характерно для негативної фази іоносферної бурі: посилена рекомбінація на фоні підвищеної температури та молекулярного складу. Лише наприкінці інтервалу (22:30–23:10) спостерігається зростання N_e до $\sim(0,7-1,5)\cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ на висотах 280–420 км, що можна трактувати як початок фази відновлення та частковий перехід до позитивної фази іоносферної бурі.

Після 6 листопада параметри космічної погоди поступово повертаються до помірних значень ($p < 5$ нПа, $Kp \leq 4$, Dst відновлюється). Тим не менш, дані вимірювань показують, що високоширотна іоносфера залишається збуреною ще як мінімум дві доби.

Протягом дня 6 листопада фіксується кілька інтервалів зниженої N_e ($\sim 0,2-0,3\cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$) на різних висотах при підвищених T_e (до $3,8\cdot 10^3 \text{ К}$) та широкій смузі значень $O^+/N_2 \approx 0,5-0,7$ на висотах 150–250 км. На висотах 260–660 км до $\sim 23:00$ зберігаються підвищені значення T_i ($1,5-2,5\cdot 10^3 \text{ К}$) та швидкості дрейфу $\approx 250 \text{ м/с}$, що свідчить про суттєві конвективні процеси та джоулів нагрів. Лише після 23:00 6 листопада спостерігається перехід до режиму знижених T_i ($\sim 1200-1400 \text{ К}$) та швидкостей дрейфу плазми ($\leq 50 \text{ м/с}$), одночасно зі зростанням N_e до $\sim(0,7-1,5)\cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ на висотах 180–420 км. Це можна трактувати як перехід від негативної до позитивної фази бурі та ослаблення конвекції. Таким чином, у цей період спостерігається комбінація ряду чинників в сенсі відгуку іоносфери на збурення: тривала депресія N_e за рахунок зміни складу іоносферної плазми та нейтралів; подальше відновлення і поява області підвищеної концентрації при конвекції, що вже слабшає.

До вечора 7 листопада і в ніч на 8 листопада спостерігається досить стабільна область підвищеної N_e ($\sim(0,7-1,4)\cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$) на висотах 180–400 км з максимумом близько 200–280 км. T_e на висотах 180–330 км знижується до 1700–2000 К, в той час як на висотах 360–470 км залишається дещо підвищеною (до 3600 К). Відношення $O^+/N_2 \approx 0,5-0,7$ на висотах 180–230 км практично не змінюється, що вказує на стабілізацію конвективних процесів. У той самий час на висотах > 350 км зберігаються помірно підвищені значення T_i ($1,6-2,5\cdot 10^3 \text{ К}$) і швидкості дрейфу плазми ($\approx 250 \text{ м/с}$).

Отже, до кінця 7 листопада іоносфера поблизу північного полюса загалом повертається до режиму, близького до такого, що спостерігався перед бурею протягом 2 та 3 листопада, проте верхні шари іоносфери та атмосфери зберігають підвищені температури і швидкості дрейфу плазми.

На всіх часових інтервалах значні структури в N_e , T_e , T_i , O^+/N_2 і швидкості дрейфу спостерігаються в областях, де $\text{SNR} \geq 2-3$ і вище, що свідчить про надійність вимірів. Області з низьким SNR, де параметри погано визначені, не впливають на основні висновки.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Радар некогерентного розсіяння зафіксував повний цикл багатокрокової бурі 4–5 листопада 2023 р., а саме від спокійного фону до послідовних ступенів головної фази магнітної бурі та подальшого повернення високоширотної іоносфери до стану, що мав місце перед бурею 2 та 3 листопада.

2. Найбільші збурення спостерігалися в ніч 4–5 листопада та в другій половині 5 листопада та супроводжувалися екстремальними значеннями T_i до $(5-6)\cdot 10^3 \text{ К}$, великими швидкостями $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ дрейфу ($> 500 \text{ м/с}$), локальними збуреннями T_e та падінням O^+/N_2 .

3. Ефекти якісної зміни хімічного складу іоносферної плазми та термосфери (зміна розподілу по висоті значень відношення O^+/N_2 та висоти рівня біля 0,5) відіграли ключову роль у формуванні негативної фази іоносферної бурі, особливо 5–6 листопада, коли N_e залишалася заниженою при підвищених температурах та збереженні конвекції.

4. Відновлення після цих збурень зайняло щонайменше дві доби: спочатку відновилася концентрація електронів (22:00 6 листопада – 8:00 8 листопада), потім повернулися до фонових значень температура електронів, іонів і швидкості дрейфу плазми, тоді як посилені конвективні процеси на висотах більших 360 км зберігалися до кінця періоду спостережень.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. Levis C, Johnson T, Teixeira L. Radiowave Propagation: Physics and Applications. John Wiley & Sons Inc. WILEY. 2010. 320 p.
2. Allnutt J. Satellite to Ground Radiowave Propagation. IET. 2011. 696 p.
3. Chernogor L. Physics of geospace storms. *Space Sci. & Technol.* 2021;27(1):03–77. DOI:10.15407/knit2021.01.003
4. Chernogor LF. A two-step geospace storm as a new tool of opportunity for experimentally estimating the threshold condition for the formation of a substorm current wedge. *Ann. Geophys.* 2025;43:15–35. <https://doi.org/10.5194/angeo-43-15-2025>
5. Chernogor LF. Energetics of physical processes operated on May 8–12, 2024: From the solar storm to lithospheric disturbances. *Adv. Space Res.* 2025;75(6):4825–4849. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.12.069>
6. Chernogor LF. What are a geospace storm and a pan-planetary storm? *Adv. Space Res.* 2025;76(9):5640–5657. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.08.016>
7. Agyei-Yeboah E., Fagundes PR., Tardelli A., Pillat V., Vieira FJA., Bolzan MJA. Global ionospheric response to a G2 and a G3 geomagnetic storms of November 4 and 5, 2023. *Adv. Space Res.* 2025;75:5580–5602. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.01.046>
8. Site of NOAA organisation. Available from: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>
9. Muldrew D. F Layer Ionization Troughs Deduced from Alouette Data. *J. Geophys. Res.* 1965;70:2635–2650. 10.1029/JZ070i011p02635
10. Sharp GW. Midlatitude trough in the night ionosphere. *J. Geophys. Res.* 1966;71(5):1345–1356. 10.1029/JZ071i005p01345
11. Taylor JrHA., Walsh W.J. The light-ion trough, the main trough, and the plasmapause. *J. Geophys. Res.* 1972;77(34):6716–6723. 10.1029/JA077i034p06716
12. Knudsen WC. Magnetospheric convection and the high-latitude F₂ ionosphere. *J. Geophys. Res.* 1974;79(7):1046–1055. 10.1029/JA079i007p01046
13. Knudsen WC., Banks PM., Winningham JD., Klumpar DM. Numerical model of the convecting F₂ ionosphere at high latitudes. *J. Geophys. Res.* 1977;82(29):4784–4792. 10.1029/JA082i029p04784
14. Quegan S., Bailey G.J., Moffet R.J., Heelis R.A., Fuller-Rowell T.J., Rees D., Spiro R.W. A theoretical study of the distribution of ionization in the high-latitude ionosphere and the plasmasphere: First results on the mid-latitude trough and the light-ion trough. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1982;44:619–640. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(82\)90073-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(82)90073-3)
15. Sojka JJ, Raitt WJ, Schunk RW. A Theoretical Study of the High-Latitude Winter F Region at Solar Minimum for Low Magnetic Activity. *J. Geophys. Res.* 1981;86(A2):609–621. 10.1029/JA086iA02p00609
16. Watkins BJ. A numerical computer investigation of the polar F-region ionosphere. *Planet and Space Sci.* 1978;26(6):559–569. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(78\)90048-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(78)90048-X)
17. Sojka JJ., Raitt WJ., Schunk RW. Effect of displaced geomagnetic and geographic poles on high-latitude plasma convection and ionospheric depletions. *J. Geophys. Res.* 1979;84(10):5943–5951. <https://doi.org/10.1029/JA084iA10p05943>
18. Aarons J. Global morphology of ionospheric scintillations. *Proc. IEEE*, 1982;70(4):360–378. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12314>
19. Aarons J. 50 years of radio-scintillation observations. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 1997;39(6):7–12. <https://doi.org/10.1109/74.646785>
20. Kelley MC. The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics. Academic Press. 2009. 551p.
21. Schnuk RW., Nagy AF. Ionospheres. Physics, Plasma Physics, and Chemistry. Cambridge University Press. 2009. 628p.
22. Chappell CR, Schunk RW, Banks PM, Thorne RM, Burch JL. Magnetosphere–Ionosphere Coupling in the Solar System. Wiley. 2016. 414p.
23. International Communication Union. Handbook, the ionosphere and its effects on radiowave propagation. International Telecommunication Union Radiocommunication Bureau. 1998. 153p.
24. Blaunstein N., Plohotniuk E. Ionosphere and applied aspects of radio communication and radar. CRC Press. 2008. 600p.

25. Campbell WH. Observation of electrical currents in the Alaska oil pipeline resulting from auroral electrojet current sources. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1980;61:437–448.
26. Boteler DH. Geomagnetic effects on the pipe-to-soil potentials of a continental pipeline. *Adv. Space Res.* 2000;26(1):15–20. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)01020-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)01020-0)
27. Boteler DH. Geomagnetic hazards to conducting networks. *Nat. Hazards.* 2003;28:537–561. <https://doi.org/10.1023/A:1022902713136>
28. Boteler DH., Pirjola RJ., Nevanlinna H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface. *Adv. Space Res.* 1998;22(1):17–27. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)01096-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01096-X)
29. Adeniyi JO. Magnetic storm effects on the morphology of the equatorial F2-layer. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1986;48(8):695.
30. Wu YW., Liu RY., Zhang BC., Wu ZS., Hu HQ., Zhang SR., Zhang QH., Liu JM., Honary F. Multi-instrument observations of plasma features in the Arctic ionosphere during the main phase of a geomagnetic storm in December 2006. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013;105:358.
31. Förster M., Jakowski N. Geomagnetic storm effects on the topside ionosphere and plasmasphere: a compact tutorial and new results. *Surv. Geophys.* 2000;21(1):47.
32. Borries C., Jakowski N., Wilken V. Storm induced large scale TIDs observed in GPS derived TEC. *Ann. Geophys.* 2009;27(4):1605.
33. Hunsucker RD. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review. *Rev. Geophys.* 1982;20(2):293.
34. Song Q., Ding F., Wan W., Ning B., Liu L., Zhao B., Li Q., Zhang R. Statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances generated by the solar terminator over China. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2013;118(7):4583.
35. Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2004;109(A6).
36. Tsugawa T., Otsuka Y., Coster A.J., Saito A. Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America. *Geophys. Res. Lett.* 2007;34(22).
37. Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., Aragón-Ángel A. Propagation of medium scale traveling ionospheric disturbances at different latitudes and solar cycle conditions. *Radio Sci.* 2012;47(6).
38. Nishioka M., Saito A., Tsugawa T. Super-medium-scale traveling ionospheric disturbance observed at midlatitude during the geomagnetic storm on 10 November 2004. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2009;114(A7).
39. Georges TM. Infrasound from convective storms: Examining the evidence. *Rev. Geophys.* 1973;11(3):571.
40. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Ann. Geophys.* 1996;14(9):917.
41. Site of the OmniWeb mission. Available from: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>
42. Site of the World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. Available from: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>
43. Site of Madrigal database. Available from: millstonehill.haystack.mit.edu
44. Nicolls MJ., Varney RH., Vadas SL., Stamus PA., Heinselman CJ., Cosgrove RB., Kelley MC. Influence of an inertia-gravity wave on mesospheric dynamics: A case study with the Poker Flat Incoherent Scatter Radar. *J. Geophys. Res.* 2010;115:D00N02. doi:10.1029/2010JD014042
45. Michell RG., Grydeland T., Samara M. Characteristics of Poker Flat Incoherent Scatter Radar (PFISR) naturally enhanced ion-acoustic lines (NEIALs) in relation to auroral forms. *Ann. Geophys.* 2014;32:1333–1347. <https://doi.org/10.5194/angeo-32-1333-2014>
46. Site of Advanced Modular Incoherent Scatter Radar. Available from: <https://amisr.com/amisr/links/data-access/>
47. Site of SRI ISR Database. Available from: <https://data.amisr.com/database/61/exp-list/2023/11/>
48. Panasenko S, Aksonova K, Kotov D. Characteristics of traveling ionospheric disturbances from incoherent scatter data: monograph. *Primedia ELaunch LLC.* 2021. 148p. <https://doi.org/10.36074/PaAkKo.monograph-2021>

Стаття надійшла до редакції: 2 жовтня 2025

Рекомендовано до друку: 11 листопада 2025

Опубліковано: 30 грудня 2025

ANALYSIS OF DISTURBANCES IN THE HIGH-LATITUDE IONOSPHERE DURING A MULTI-STEP MAGNETIC STORM ON NOVEMBER 4-5, 2023 BASED ON INCOHERENT SCATTERING RADAR DATA

L. F. Chernogor, M. Yu. Tkachenko

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Relevance. The ionosphere is a key radio channel for radio communications, navigation, radiolocation, remote sensing and radio astronomy. Its condition determines the quality of operation of ground and space technological systems. The most powerful disturbances in the parameters of the ionosphere are caused by solar storms. As a result, radio communications, radar and radio sounding of near-Earth and deep space may be disrupted or made impossible. The high-latitude ionosphere (above $\pm 60^\circ$) is most sensitive to such influences, where magnetospheric convection, current amplification, Joule heating, and energetic particle precipitation simultaneously manifest themselves. Incoherent scattering radar makes it possible to study the temporal and spatial dynamics of key ionosphere parameters — electron and ion temperatures, electron concentration, plasma velocities, and ionic composition. Since changes in the state of the ionospheric channel can cause failures or make it impossible to conduct a radio communication session, the operation of radio navigation devices, and positioning using satellite navigation systems, a comprehensive study of such disturbances is relevant.

The aim of this work is to study the features of disturbances in the high-latitude ionosphere using incoherent scattering radar.

Methods and Methodology. According to measurements from the Poker Flat incoherent scattering radar (Alaska, USA) during a multi-step magnetic storm on November 4–5, 2023, a study was conducted and the parameters of high-latitude ionospheric disturbances in the Northern Hemisphere were established.

Results. It was found that the largest disturbances were observed on the night of November 4–5 and in the second half of November 5 and were accompanied by extreme values of T_i up to $(5-6) \cdot 10^3$ K, high velocities of $E \times B$ drift (> 500 m/s), local disturbances of T_e and a drop in O^+/N_2 . The effects of a qualitative change in the chemical composition of the ionospheric plasma and thermosphere (a change in the distribution of the O^+/N_2 ratio values over height and a level height of about 0.5) played a key role in the formation of the negative phase of the ionospheric storm, especially on November 5–6, when N_e remained low at elevated temperatures and the preservation of convection. Recovery from these disturbances took at least two days: first, the electron concentration recovered (22:00 on November 6 - 8:00 on November 8), then the electron and ion temperatures and plasma drift velocities returned to background values, while enhanced convective processes at altitudes above 360 km persisted until the end of the observation period.

KEY WORDS: *ionosphere, magnetic storm, incoherent scattering, ionospheric disturbances, features of the ionospheric reaction.*

The article was received by the editors: October 2 2025

The article is recommended for printing: November 11 2025

Published: December 30 2025