



КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ
НАУК УКРАЇНИ

Том 27
1 (128)
2021

SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ + ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. + ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ НА РІК + КИЇВ

ЗМІСТ

Космічна й атмосферна фізика

Чорногор Л. Ф. Фізика геокосмічних бур. 3

Власов Д. І., Парновський О. С. Прогнозування локальних геомагнітних збурень на прикладі даних магнітної обсерваторії «Львів» 78

Динаміка та керування космічними апаратами

Редчиць Д. О., Моїсєєнко С. В. Чисельне моделювання нестационарних потоків холодної плазми при роботі плазмового актуатора. 85

Космічна енергетика і двигуни

Андрієвський М. В., Мітіков Ю. О. Вплив витоку компонента з порожнини насоса в область турбіни на стійкість роботи турбонасосного агрегата. 97

CONTENTS

Space and Atmospheric Physics

Chernogor L. F. Physics of geospace storms 3

Vlasov D., Parnowski A. Prediction of local geomagnetic activity on the example of data of “Lviv” Magnetic Observatory 78

Spacecraft Dynamics and Control

Redchyts D. O., Moiseienko S. V. Numerical simulation of unsteady flows of cold plasma during plasma actuator operation 85

Space Energy, Power and Propulsion

Andriievskiy M. V., Mitikov Y. O. Influence of propellant leakage from pump area into turbine area on turbo-pump operation stability 97

На першій сторінці обкладинки — Схема взаємодії сонячного вітру з магнітосферою Землі: 1 — сонячний вітер; 2 — магнітопауза; 3 — головна ударна хвиля; 4 — області захопленої радіації; 5 — зона полярних сьайв; 6 — хвіст магнітосфери; 7 — нейтральний шар; 8 — касп (див. статтю Черногор Л. Ф., С. 3–77)

Журнал «Космічна наука і технологія» включено до переліку наукових фахових видань України, в яких публікуються результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата фізико-математичних, технічних, біологічних, геологічних та юридичних наук

Відповідальний секретар редакції О.В. КЛИМЕНКО

Адреса редакції: 01030, Київ-30, вул. Володимирська, 54
тел./факс (044) 526-47-63, ел. пошта: reda@mao.kiev.ua
Веб-сайт: space-scitechnjournal.org.ua

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.
Перереєстровано Міністерством юстиції України 21.11.2018 р.,
Свідоцтво серія КВ № 23700-13540 ПР

Підписано до друку 03.03.2021. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон.
Ум. друк. арк. 10,71. Обл.-вид. арк. 11,25. Тираж 100 прим. Зам. № 6240.

Оригінал-макет виготовлено і тираж віддруковано ВД «Академперіодика» НАН України
вул. Терещенківська, 4, м. Київ, 01024

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>
УДК 551.5:539.104(078)

Л. Ф. ЧОРНОГОР

зав. кафедри космічної радіофізики, д-р фіз.-мат. наук, проф.
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

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

ФІЗИКА ГЕОКОСМІЧНИХ БУР

Представлено огляд сучасного стану знань про взаємозв'язок сонячно-земних процесів, прояви геокосмічних бур (ГБ) і варіації атмосферно-космічної погоди. Ефекти геокосмічних бур аналізуються з позицій системної парадигми. Системою, в якій розвиваються геокосмічні бурі, є об'єкт «Сонце — міжпланетне середовище — магнітосфера — іоносфера — атмосфера — Земля (внутрішні оболонки)» (СМСМІАЗ). Детально розглянуто надсильну геокосмічну бурю, що мала місце 7...10 листопада 2004 року. Наведено результати комплексних спостережень ефектів цієї бурі. Відзначається, що дослідження фізичних ефектів геокосмічних бур — найважливіший науковий напрям у космічній геофізиці. Проблема взаємодії підсистем у системі СМСМІАЗ протягом ГБ — міждисциплінарна. Для її розв'язання необхідний системний підхід. Проблема носить багатofакторний характер. Реакція підсистем визначається одночасним (синергетичним) впливом низки збудувальних чинників. Важливо, що система СМСМІАЗ — відкрита, нелінійна та нестационарна. У ній виявляються прямі та зворотні, позитивні та негативні зв'язки. Зважаючи на багатогранність проявів геокосмічних бур, через унікальність кожної бурі вивчення фізичних ефектів геокосмічних бур далеке від завершення. Окрім завдань всебічного дослідження фізичних ефектів геокосмічних бур, доволі актуальними залишаються задачі їхнього детального адекватного моделювання та прогнозування. Їхнє розв'язання сприятиме виживанню та стійкому розвитку нашої цивілізації, що опановує усе досконаліші та складніші технології. Що більшим буде технологічний розвиток земель, то уразливішою буде інфраструктура цивілізації до дії сонячних і геокосмічних бур. Запропоновано класифікацію ГБ за значенням функції Акасофу. Введено шість типів ГБ і запропоновано індекс ГБ. Запропоновано класифікацію іоносферних бур і збурень за величиною зміни концентрації електронів у максимумі шару F2. Введено п'ять типів іоносферних бур. Запропоновано іоносферний індекс, що описує інтенсивність негативних і позитивних іоносферних бур. Запропоновано класифікацію іоносферних бур і збурень за величиною зміни концентрації електронів у нижній іоносфері. Введено шість типів позитивних іоносферних збурень та запропоновано відповідний іоносферний індекс. Встановлено фізичну схему розвитку кожної групи іоносферних бур і збурень. Показано взаємозв'язок магітних, іоносферних, атмосферних і електричних бур.

Ключові слова: геокосмічна буря, основні ефекти, приклади впливів бур, системна парадигма, енергетика процесів, сонячні бурі, результати експериментів, статистика та класифікація магітних бур, статистика та класифікація іоносферних бур, класифікація геокосмічних бур.

СПИСОК ОСНОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

СМЕ — корональні викиди маси
SC — раптовий початок
АПФ — адаптивне перетворення Фур'є
ВАП — варіації атмосферної погоди
ВЗ — вертикальне зондування
ВКП — варіації космічної погоди
ВП — вейвлет-перетворення
ВПФ — віконне перетворення Фур'є
ГБ — геокосмічна буря

ГП — головний іоносферний провал
ІБ — іоносферна буря
МБ — магітна буря
ММП — міжпланетне магітне поле
НІБ — негативна іоносферна буря
НР — некогерентне розсіяння
ПЕВ — повний електронний вміст
ПІБ — позитивна іоносферна буря
РАЗ — рухомі атмосферні збурення
ХЗ — хвильове збурення
ЧВ — часткове відбиття

Цитування: Чорногор Л. Ф. Фізика геокосмічних бур. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 1 (128). С. 3—77.
<https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>

1. ВСТУП

Біля витоків сонячно-земної фізики і геліобіології у першій чверті XX століття стояв російський дослідник О. Л. Чижевський. Він вперше обґрунтував зв'язок процесів на Сонці із земними процесами, вперше вжив термін «космічна погода», який з 1990-х рр. став загальноприйнятим. О. Л. Чижевський був переконаний, що «...життя повинне вважатися явищем космічним, роботою космічних сил». Йому належать такі рядки:

Мы дети Космоса. И наш родимый дом
Так спаян общностью и неразрывно прочен,
Что чувствуем себя мы слитыми в одном,
Что в каждой точке мир — весь мир сосредоточен...

Ідеї О. Л. Чижевського підхоплені низкою дослідників.

На початку 1940-х рр. В. І. Вернадський стверджував: «Зв'язок космічної реальності з нами набагато глибший і буденніший, ніж ми думаємо». Проте приблизно до 1957 р. (до запуску першого ШСЗ) геліофізика і геофізика йшли своїми, практично незалежними шляхами.

В даний час проблема геокосмічних бур — найважливіша проблема космофізики і космічної геофізики, вона є частиною проблеми сонячно-земних зв'язків. Загальним питанням цієї проблеми присвячено тисячі наукових робіт [1—5, 19—21, 39, 59—61, 76, 77, 112, 120, 124, 135, 147, 152, 157, 158, 164, 165, 182, 188, 202, 205—207 тощо].

Сонячно-земні зв'язки виявляються у різноманітні геофективних потоків широкодіапазонного електромагнітного випромінювання, високоенергійних протонів і релятивістських електронів, а також сонячного вітру (сонячної плазми). Електромагнітне випромінювання досягає Землі через 8 хв, потоки високоенергійних частинок — через час від 20...30 хв до 20...30 год, потоки плазми — через 2...4 доби.

Зростання інтенсивності електромагнітного випромінювання Сонця (в рентгенівському й ультрафіолетовому діапазонах) призводить до збільшення концентрації електронів в іоносфері і, як наслідок, до раптових іоносферних збурень (SID), супроводжуваних збільшенням поглинання космічного радіовипромінювання, сигналів гектометрового і декаметрового діапазонів,

фазових аномалій сигналів кілометрового і міріаметрового діапазонів і т. п.

Збільшення потоків високоенергійних частинок призводить до додаткової іонізації атмосфери на висотах менше 100 км, створює підвищену радіаційну небезпеку для космічних апаратів, космонавтів, висотних літаків.

Збурення, генеровані Сонцем, корональні викиди маси (СМЕ), міжпланетні корональні викиди маси (ІСМЕ), які коротують області взаємодії (CIR), та ударні хвилі сонячного походження в результаті складної взаємодії сонячного вітру з магнітним полем Землі, призводять до геокосмічних бур. Інтенсивні бурі викликають не тільки порушення радіозв'язку, але і збої в роботі ліній електропередач, систем навігації, зміни траєкторій космічних кораблів, впливають на погоду, здоров'я людей і стан всієї біосфери Землі.

Геокосмічна буря (ГБ) супроводжується сильними збуреннями геомагнітного поля, іоносфери, верхньої атмосфери, геоелектричного поля магнітосферно-іоносферного походження і навіть тропосфери, а також земних струмів. Виникає взаємодія двох погодних систем — космічної та атмосферної. Тому є сенс розглядати атмосферно-космічну погоду в цілому.

Освоєння геокосмосу, його використання для потреб людства призвело до того, що повсякденне життя людини все більше залежить від проявів сонячно-земних процесів, стану атмосферно-космічної погоди та наземно-космічних технологічних систем. Все це зумовлює актуальність, велику наукову і практичну значимість дослідження проявів сонячно-земних процесів, варіацій атмосферно-космічної погоди та ефектів геокосмічних бур у всіх геосферах, включаючи біосферу.

Важливо підкреслити, що кожна ГБ є унікальною подією, яка характеризується великою різноманітністю фізичних ефектів, їхньою власною індивідуальною динамікою.

Дослідження геокосмічних збурень і супутнім процесів з метою прогнозування і попередження технологічних катастроф стало важливим розділом космофізики, космічної геофізики, фізики сонячно-земних зв'язків. З'явився новий

науковий напрям, орієнтований на всебічне вивчення ефектів геокосмічних бур, моделювання і прогнозування космічної погоди.

Магнітні, іоносферні, атмосферні і електричні бурі, як прояв єдиного процесу — геокосмічної бурі, часто охоплюють майже всю планету одночасно. Для всебічного дослідження ГБ необхідні добре сплановані експерименти у планетарному масштабі, обмін даними, їхній спільний аналіз. Така співпраця у вивченні навколоземного простору здійснюється в рамках великих міжнародних проєктів, що використовують сучасні наземні засоби дослідження (іонозонди, радарі некогерентного розсіяння, магнітометри, оптичні установки тощо) і засоби космічного базування (супутники).

Дослідженню магнітних і іоносферних збурень, а також супутніх їм явищ присвячено велику кількість робіт. Огляди результатів досліджень цих бур наведені, наприклад, в роботах [40, 130, 140].

Серед числа міжнародних програм — програма STEP (Solar-Terrestrial Energy Program), яка з 1990 р. об'єднує зусилля вчених різних країн у дослідженні процесів переносу енергії в системі Сонце — Земля. Проєкт CEDAR (Coupling, Energetics, and Dynamics of Atmospheric Regions) за підтримки Національного наукового фонду США координує роботи з вивчення взаємодії високоенергетичних і динамічних процесів у верхній атмосфері Землі. Відповідно до програми CEDAR Storm Study [128] протягом 1990—1997 рр. проведено серію координованих спостережень іоносферно-термосферних збурень на світовій мережі радарів некогерентного розсіяння. Ці роботи були розширені додатковими дослідженнями в рамках ще однієї великої програми NSWP (National Space Weather Program), спрямованої на вивчення і прогнозування космічної погоди з метою запобігання збоїв в роботі комерційних і військових систем зв'язку [181]. NSWP включає дослідження, аналіз і синтез взаємодії всіх елементів системи Сонце — Земля під час геокосмічної бурі «від початку до кінця». У програму входить широке коло проблем: активні процеси на Сонці, сонячний вітер, міжпланетне середовище, збурення магнітосфери Землі, іоносфери і термосфери. Аналогічні

роботи, спрямовані на моделювання і синтез процесів в системі СМСМІАЗ, проводить міжнародна програма сонячно-земної фізики ISTP (International Solar-Terrestrial Physics Program). Огляд найважливіших результатів вивчення варіацій космічної погоди наведено в роботах [152, 202, 203, 205, 206].

В Європі дослідження іоносферних збурень здійснює програма PRIME (COST 238) [125]. Згідно з нею проведено ряд координованих циклів вимірювань на мережі іонозондів. Їхні результати використано для розробки іоносферних моделей, що дають інформацію про основні фізико-хімічні процеси, що визначають морфологію і динаміку іоносфери європейського регіону, а також про розвиток іоносферно-термосферних збурень і їхнє поширення в низькі широти під час геокосмічних бур.

Одним з актуальних завдань космічної геофізики є розробка глобальної довідкової моделі іоносфери. Таку модель створено спільними зусиллями Комітету з космічних досліджень COSPAR (Committee on Space Research) і Міжнародного радіосоюзу URSI (International Union of Radio Science). Це модель IRI (International Reference Ionosphere) [121], яка описує поведінку іоносфери у магнітоспокійних умовах. В даний час зусилля вчених спрямовано на розвиток цієї моделі стосовно збуреної геокосмічними бурями іоносфери [122].

Інтенсивні дослідження протягом останнього десятиліття, зокрема в рамках перерахованих програм, значно просунули наші знання про взаємозв'язок сонячно-земних процесів, проявів геокосмічних бур і варіацій космічної погоди. Проте залишається багато проблем у розумінні фізичних процесів, супутніх геокосмічним бурям. Справа в тому, що кожна буря поряд із загальними закономірностями має індивідуальні особливості. Ще складніше йдуть справи з моделюванням і прогнозуванням цих процесів у глобальних масштабах у всіх областях навколоземного простору. Спостереження кожної ГБ дає цінний внесок у розв'язання названих проблем.

Встановлено, що геокосмічні бурі супроводжуються значними збуреннями геомагнітного поля, атмосфери, іоносфери і електричного

поля. Основне енерговиділення відбувається у високих широтах, що призводить до нагрівання термосфери, її розширення, посилення спрямованого до екватора нейтрального вітру, генерації рухомих атмосферних збурень [190, 201]. Все це змінює склад термосфери [172]. Одночасно з цим має місце проникнення високоширотного іоносферного електричного поля в середні і низькі широти [194]. Субавроральне електричне поле посилюється і проникає в екваторіальні широти [146]. Відбувається збурення електричного поля в динамо-області іоносфери [123]. Все це сприяє розвитку іоносферної бурі.

В результаті перерахованих процесів спостерігається синергетична взаємодія магнітної, атмосферної, електричної та іоносферної бур [41, 69, 87, 91—95, 101, 102, 104—107, 138, 139, 215].

Іоносферні бурі вивчаються понад 50 років [170, 183]. Їм присвячено ряд робіт [118, 130, 156, 168—179, 189, 191, 195, 196, 198, 199]. Статистику бур представлено в роботі [203]. Особливості просторово-часового розподілу ефектів іоносферних збурень описано в роботах [169, 198]. Моделювання ефектів іоносферних збурень проводилося в роботах [134, 148, 166, 176, 177].

Статистику найсильніших МБ представлено в роботі [211]. Статистичні властивості магнітних бур за 1985—2005 і 1932—2009 рр. обговорюються в роботі [155].

Метою цієї роботи є огляд наших знань про взаємозв'язок сонячно-земних процесів, про прояви геокосмічних бур і варіації атмосферно-космічної погоди¹. В роботі основну увагу зосереджено на ефектах середньоширотної геокосмічної бурі, вивчених значно менше, ніж ефекти бурі у високих широтах.

2. ОСНОВНІ ОЗНАЧЕННЯ

Геокосмічна буря (ГБ) — це сильні збурення геомагнітного поля, динамічних процесів радіаційних поясів, іоносфери, верхньої атмосфери, геоелектричного поля магнітосферно-іоносферного походження і навіть тропосфери, а також

¹ Статтю підготовлено на основі замовної доповіді на 18-й Українській конференції з космічних досліджень (17—20 вересня 2018 р., Київ)

земних струмів. Геокосмічна буря є сукупністю магнітної, іоносферної, атмосферної і електричної бур, які синергетично взаємодіють між собою.

Космічна погода — фізичний і феноменологічний стан природного космічного оточення, що включає Сонце, сонячний вітер і геокосмос (магнітосферу, іоносферу і термосферу), а також їхню взаємодію з Землею, біосферою і техносферою. Характерний час варіацій космічної погоди змінюється від кількох хвилин до декількох діб.

Космічний клімат — усереднений на досить великому часовому інтервалі стан космічної погоди.

Атмосферно-космічна погода — фізичний і феноменологічний стан системи, що включає Сонце, сонячний вітер, геокосмос (магнітосферу, радіаційні пояси, іоносферу і термосферу), нижню атмосферу, океан і сушу, а також їхню взаємодію з біосферою і техносферою.

3. ЕФЕКТИ ГЕОКОСМІЧНИХ БУР

Перерахуємо коротко основні ефекти, які виникають під час геокосмічної бурі.

1. Дія космічного випромінювання на електронне обладнання та екіпажі космічних апаратів і літаків.
2. Зміна орбіт космічних апаратів.
3. Індукування струмів у довгих провідних системах (ЛЕП, кабельних лініях, трубопроводах і автоматизованих засобах залізниць).
4. Порушення умов поширення радіохвиль, порушення в системах телекомунікації, радіолокації, радіонавігації, радіопеленгації і радіоастрономії.
5. Вплив на погоду- і кліматоформувальні чинники.
6. Зміна хімічного складу атмосфери.
7. Вплив на людину і біосферу в цілому.

4. ПРИКЛАДИ ВПЛИВІВ ГЕОКОСМІЧНИХ БУР НА ЗЕМНУ ЦИВІЛІЗАЦІЮ ТА ЇЇ ТЕХНОЛОГІЧНУ ДІЯЛЬНІСТЬ

Наведемо кілька прикладів, часто обговорюваних в літературі, які свідчать про «уразливість» сучасної цивілізації до процесів, супутніх геокосмічним бурям [1].

1. 24 березня 1940 р. найсильніша ГБ стала причиною виходу з ладу приблизно 80 % всіх магістральних телефонних мереж у Міннеаполісі (штат Міннесота, США), порушення електропостачання цілих районів в штатах Нова Англія, Нью-Йорк, Міннесота, Пенсильванія, Квебек і Онтаріо.

2. 9—10 лютого 1958 р. ГБ викликала порушення роботи телеграфної мережі, зробила проблематичним трансатлантичний кабельний зв'язок між Ньюфаундлендом і Шотландією, перервала зв'язок у Торонто (Канада).

3. 4 серпня 1972 р. вкрай сильна ГБ викликала припинення зв'язку по кабелю між містами Плато і Каскад (США). Також вийшов з ладу потужний трансформатор на гідроелектростанції у штаті Британська Колумбія (США). Примітно, що 4 серпня 1972 р., в один з днів американо-в'єтнамської війни, відбулася унікальна подія: магнітна буря спровокувала несанкціонований підрих двох десятків магнітних морських мін [161].

4. Сильна ГБ привела до непередбачено швидкого гальмування в атмосфері і падіння 11 липня 1979 р. космічної лабораторії «Skylab» (США) [<http://neprohgi.livejournal.com/70392.html>]. Подібна доля спіткала і радянську орбітальну станцію «Салют-5» в липні — серпні 1977 р.

5. 13—14 березня 1989 р. найсильніша ГБ стала причиною виходу з ладу системи електропостачання потужністю 20 ГВт у Квебеку (Канада). Без електроенергії залишилися близько 3 млн осіб. Перервався зв'язок в декаметровому діапазоні радіохвиль. У метровому діапазоні, навпаки, різко збільшилася дальність поширення радіохвиль, що істотно погіршило заводну обстановку. Орбіта ряду ШСЗ зменшилася на 3...7 км.

6. Протягом ГБ, що мала місце в кінці жовтня — на початку листопада 2003 року, сталися аварії в енергосистемі м. Мальме (Швеція), в штатах Нью-Йорк і Вісконсин (США), порушення функціонування систем телекомунікацій і GPS-навігації, вихід з ладу багатьох ШСЗ різних країн (втрата зв'язку, вихід з ладу телеметрії, відключення комп'ютерів і т. п.).

7. 23 травня 1967 р. перешкодами невідомої природи (як пізніше виявилось, викликаних со-

нячною бурею) були паралізовані радары попередження про ракетний напад та інші військові засоби НАТО. Військове керівництво США вирішило, що це початок радянського ракетно-ядерного удару [162]. У США було оголошено бойову тривогу, готувалися до вильоту бомбардувальники з ядерними боєприпасами і запуск міжконтинентальних балістичних ракет США. Світ опинився на межі ядерної катастрофи.

5. ГЕОКОСМІЧНІ БУРІ У СВІТЛІ СИСТЕМНОЇ ПАРАДИГМИ

5.1. Основні положення системної парадигми. Основні положення системної парадигми, сформульовані автором на рубежі 1970—1980-х рр., такі [69, 87, 91—95, 101, 102, 104—107, 138, 139, 215].

1. Земля і навколоземне середовище утворюють єдину природну систему. Вона складається з підсистем — внутрішніх і зовнішніх геосфер. При вивченні впливу процесів у тектоносфері (землетрусів, вулканізму, наземних і підземних вибухів і т. п.) на зовнішні геосфери доцільно розглядати систему тектоносфера — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (систему ТАІМ). З огляду на те що близько 70 % земної поверхні займає океан, приходимо до необхідності вивчення процесів у системі океан — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (системі ОАІМ). Є сенс об'єднати системи ТАІМ і ОАІМ у систему Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (систему ЗАІМ).

Ряд зв'язків між підсистемами вже встановлено, вони виявилися суттєвими, і навіть визначальними.

Як і будь-який складний об'єкт, система має властивості ієрархії, тобто має впорядковану багатоярусну структуру. Кожна підсистема в свою чергу ділиться на підсистеми — «підпідсистеми». ЗАІМ як підсистема входить в систему Земля — Сонце, остання — у Сонячну систему, яка є підсистемою в Галактиці і т. д.

При вивченні впливу на нашу планету процесів на Сонці, у міжпланетному середовищі і далекому космосі доцільно розглядати систему Сонце — міжпланетне середовище — магнітосфера — іоносфера — атмосфера — Земля (сис-

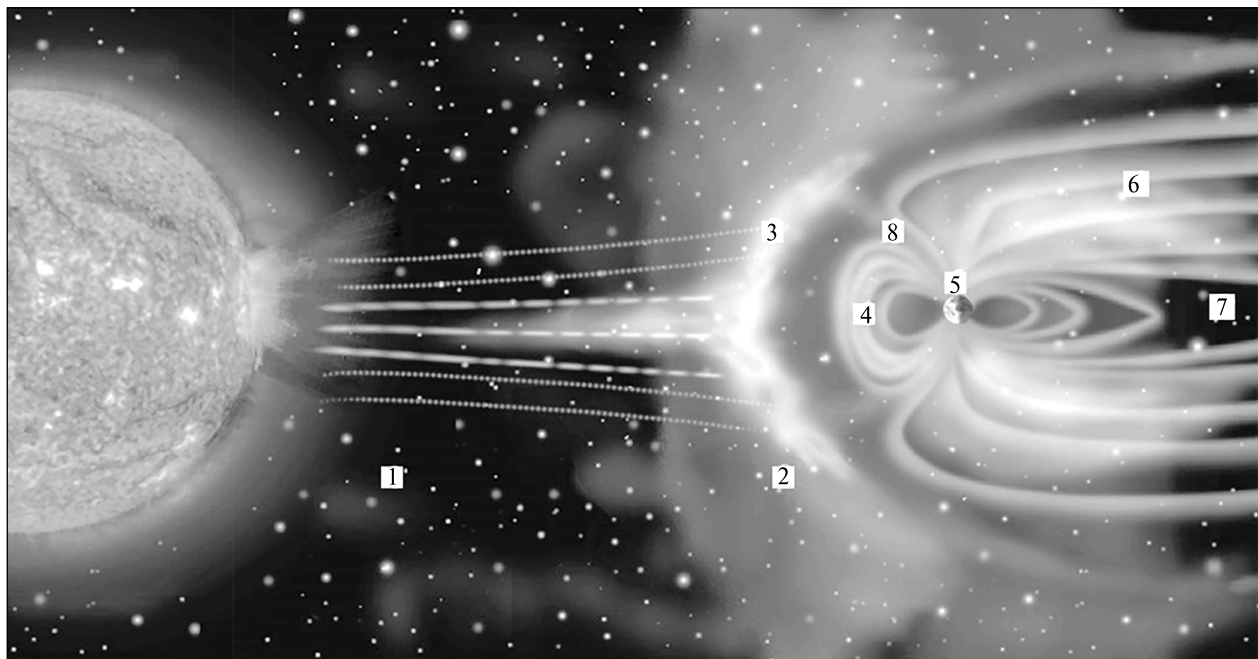


Рис. 1. Схема взаємодії сонячного вітру з магнітосферою Землі: 1 — сонячний вітер; 2 — магнітопауза; 3 — головна ударна хвиля; 4 — області захопленої радіації; 5 — зона полярних сяїв; 6 — хвіст магнітосфери; 7 — нейтральний шар; 8 — касп

тему СМСМІАЗ), а також включити біосферу (Б) і людину як підсистеми в систему СМСМІАЗБ.

2. Між складовими частинами систем ЗАІМ і СМСМІАЗ мають місце різноманітні зв'язки (прямі і зворотні, позитивні і негативні, комбінації перших і других).

3. ЗАІМ, СМСМІАЗ — відкриті системи. У них надходить випромінювання, речовина, енергія і ентропія як «знизу», так і «зверху». Відкриті динамічні нелінійні системи, що перебувають у метастабільних станах, надчутливі до впливу слабких зовнішніх збурень і флуктуацій. У таких системах можливі нестійкості, біфуркації, самоорганізація, почерговість квазідетермінованих і хаотичних режимів, тригерні процеси і т. п.

4. ЗАІМ, СМСМІАЗ — динамічні системи. Їхні узагальнені параметри змінюються в часі і просторі. Тому система описується диференціальними рівняннями у часткових похідних з початковими і граничними умовами, заданими з кінцевою похибкою.

5. ЗАІМ, СМСМІАЗ — нелінійні системи. Вихідні співвідношення, що описують відповідні фі-

зико-хімічні процеси, є нелінійними. Це призводить до далекосяжних наслідків при дослідженні еволюції систем (до біфуркації, нестійкості системи, виникнення хаотичних режимів, самоорганізації, появи впорядкованих структур тощо).

6. ЗАІМ, СМСМІАЗ є природними системами, здатними до саморозвитку за рахунок використання зовнішніх джерел енергії, випромінювання, маси і т. д.

Схематичну будову системи СМСМІАЗ показано на рис. 1 і 2 [87, 93, 94, 138, 215].

Додамо, що системний підхід частково використовується і іншими дослідниками [28, 29, 39, 55, 72, 193].

5.2. Будова систем. Основні процеси. Земля і навколишній простір, що її оточує, складається з геосфер. Усередині планети виділяють три внутрішні геосфери — ядро, мантію і земну кору (літосферу). Товщина літосфери коливається від 10 км під океанами до 60 км в області гірських систем. За сейсмічні процеси відповідає верхня геосфера, іменована тектоносферою. Її товщина становить 600...700 км. До зовнішніх геосфер

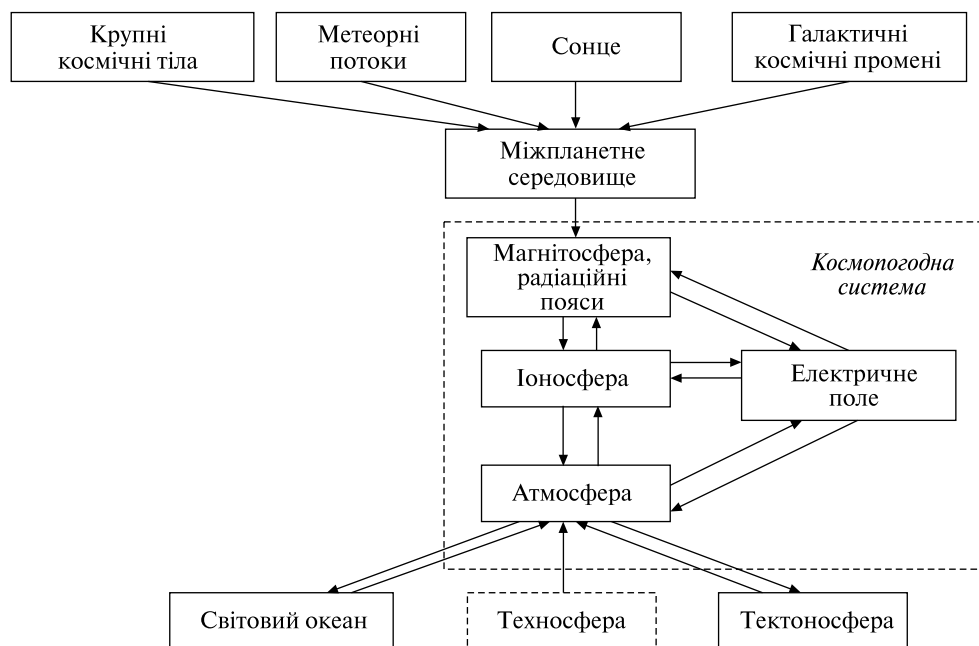


Рис. 2. Взаємодія підсистем в системах СМСМІАЗ і ЗАІМ

відносять атмосферу, її іонізовану частину — іоносферу, і магнітну оболонку Землі — магнітосферу. У свою чергу, атмосфера складається з цілого ряду геосфер — тропосфери, стратосфери, мезосфери і термосфери. У іоносфері виділяють області D, E і F. Області складаються з шарів C, D, E, Es, F1, F2. Складну структуру має і магнітосфера (рис. 1).

Розподіл на геосфери — умовний. Насправді Земля і навколишній простір — єдине утворення, що включає внутрішні і зовнішні геосфери.

Нижня межа навколосферного космічного простору — геокосмосу — лежить на висоті приблизно 100 км, а на відстані $R \approx 10R_e$ (R_e — радіус Землі) геокосмос поступово переходить у міжпланетний простір. В області геомагнітного хвоста цей розмір становить 100...200 R_e .

З огляду на те що на стан геокосмосу впливають процеси на Сонці, у міжпланетному середовищі і всередині Землі, геокосмосферою називатимемо верхню атмосферу, іоносферу та магнітосферу. Геокосмосфера входить в системи ЗАІМ і СМСМІАЗ. Ці системи відображають єдність процесів усередині планети, на поверхні Землі і у просторі навколо неї.

5.3. Процеси в системі Сонце — міжпланетне середовище — магнітосфера — іоносфера — атмосфера — Земля. Сонце — головне джерело енергії в Сонячній системі. Саме Сонце в основному визначає процеси в геокосмосі. Земля отримує від Сонця енергію у вигляді електромагнітного і корпускулярного випромінювань, а також у вигляді сонячного вітру, який, як відомо, є потоком плазми, «зануреної» у магнітне поле сонячного походження [80].

Електромагнітне випромінювання Сонця спостерігається в діапазоні довжин хвиль λ від 10^{-10} до 10 м. Максимум енергії випромінювання припадає на $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-7}$ м.

Дія електромагнітного і корпускулярного випромінювань Сонця, а також сонячного вітру викликає взаємодію підсистем і цілий комплекс процесів на Землі (див. рис. 1, 2), вивчених в даний час недостатньо [149, 191]. Нестационарні процеси на Сонці спричиняють більшість явищ у міжпланетному середовищі, магнітосфері, іоносфері, атмосфері і всередині Землі. Крім того, вони впливають на метеорологічні і біологічні процеси.

Параметри електромагнітного і корпускулярного випромінювань Сонця змінюються під час

сонячних спалахів, які викликають комплекс первинних і вторинних процесів на Землі. Серед первинних процесів — збільшення концентрації електронів в іоносфері, додатковий нагрів геокосмосфери, зміна прозорості атмосфери на висотах, де ефективно поглинаються галактичні космічні промені тощо. Перелік вторинних процесів набагато ширший. Сюди слід віднести генерацію періодичних і аперіодичних варіацій геомагнітного і геоелектричного (магнітосферного, іоносферного і атмосферного) полів, збільшення поглинання космічних радіошумів, ефект Форбуша, генерацію свистів, аврорального кілометрового випромінювання, шипіння, хорів, дискретних емісій, електростатичних електронних циклотронних емісій, плазмових осциляцій головної ударної хвилі, акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) і багато іншого.

До ще більш серйозних наслідків призводять СМЕ, що викликають збільшення щільності, швидкості і тиску сонячного вітру, «бомбардування» геокосмосу магнітними хмарами і плазмоїдами сонячного походження. Вплив цих факторів триває від 10 до 70 год. В результаті такого «бомбардування» помітно деформується магнітосфера, і до 1-2 % змінюється індукція геомагнітного поля (настає магнітна буря), нагрівається термосфера та іоносфера, в іоносфері у 2...10 разів зменшується або істотно (порядку 100—300 %) збільшується концентрація заряджених частинок, змінюється швидкість хімічних реакцій тощо. Подібні процеси в іоносфері іменуються іоносферними бурями.

Енергія збуреного сонячного вітру і магнітних хмар з магнітосфери по силових лініях проникає в атмосферу у вигляді електричних полів, потоків частинок, плазми і, в кінцевому підсумку, тепла. Джоульівська дисипація магнітосферних електричних полів і гальмування високоенергійних частинок призводять до нагрівання атмосфери, збурення системи термосферних вітрів, генерації збурень хвильової природи, перебування хімічних реакцій, варіацій атмосферного електричного поля. Сукупність цих процесів, що мають значну енергетику, можна назвати атмосферними бурями. Збурення параметрів геоелектричного поля можуть бути настільки сутте-

вими, що в цьому випадку є сенс говорити про електричну бурю.

Магнітна, іоносферна, атмосферна і електрична бурі є проявом єдиного процесу — геокосмічної бурі. Інакше кажучи, геокосмічна буря — це бурі у магнітному полі, іоносфері, атмосфері і електричному полі магнітосферно-іоносферно-атмосферного походження, які синергетично взаємодіють між собою.

У спеціальній літературі раніше геокосмічна буря називалася магнітною бурею, що, як видно з нашого визначення, не зовсім так.

Ефекти, викликані бурями, проявляються найсильніше у високих широтах, дещо меншою мірою — в середніх широтах, але зачіпають також і низькі широти. По висоті ефекти охоплюють всю систему ЗАІМ [41, 91, 104].

5.4. Процеси в системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Вище перераховано процеси, відповідальні за перенесення речовини і випромінювань «зверху». Саме вони в основному формують стан космічної погоди. Стан атмосферної погоди, як відомо, визначається переважно процесами в системі ОСА (океан — суша — атмосфера) [63]. Певною мірою на погоду впливають процеси на Сонці, проте це питання в даний час мало вивчене [3, 26, 62, 71, 77].

Не можна повністю ігнорувати потоки випромінювань і речовини «знизу», і зокрема їхній вплив на погоду і процеси в геокосмосфері. Такі потоки виникають при землетрусах, виверженнях вулканів, грозах, енергетичних атмосферних процесах тощо [22—25, 98, 103, 110].

В останні десятиліття стало ясно, що на стан системи ЗАІМ помітно впливає ряд процесів антропогенного походження. Справа в тому, що енергоозброєність людства зросла настільки, що потужність і енергія рукотворних об'єктів, виробів і процесів досягла, а в ряді випадків і перевищила відповідні параметри багатьох природних процесів і джерел [22—25, 82, 83, 85, 88—90, 98, 99, 103, 106—110, 136]. Тому потужні антропогенні впливи на підсистеми ЗАІМ також повинні братися до уваги.

Енергетика процесів на Землі, в атмосфері і геокосмосі детально обговорюється в роботі [110], а також в розділі 6.

5.5. Процеси в системі Сонце — міжпланетне середовище — магнітосфера — іоносфера — атмосфера — Земля — біосфера. Біосфера найчастіше розглядається або відокремлено, або як підсистема в системі океан — суша — атмосфера (ОСА). Природно, що процеси в системі ОСА, як і варіації атмосферної погоди (ВАП), впливають на біосферу і людину зокрема.

Відомо, що біосфера — об'єкт не тільки земний, але й космічний в тому сенсі, що вона знає на собі впливу космічних факторів — гравітації, процесів на Сонці, метеорів, потоків галактичних космічних променів тощо. Інакше кажучи, біосфера як підсистема входить в систему Космос — Земля.

Космічні і частково земні чинники формують стан космічної погоди.

Останнім часом з'явилися підстави стверджувати, що обидві погодні системи пов'язані між собою [87, 92—94, 103, 114, 115, 215]. Це означає, що на біосферу спільно (синергетично) впливають варіації як атмосферної, так і космічної погоди.

Канали впливу системи ОСА на біосферу вивчено недостатньо, хоча сам факт впливу (зокрема метеочутливість людини) відомий давно. Ще гірша справа зі знанням механізмів впливу варіацій космічної погоди (ВКП) на біосферу (людину). Факт же впливу цих варіацій обговорюється, починаючи з XIX століття. Висловлювання про вплив космосу на біосферу зустрічаються в роботах В. І. Вернадського — творця вчення про біосферу і ноосферу. Спираючись на результати досліджень своїх попередників, О. Л. Чижевський вперше науково обґрунтував гіпотезу про те, що значна кількість сонячних і земних процесів — синхронні [84, 96, 112].

Можливі впливи ВАП і ВКП, вплив фізичних полів на біосферу розглядалися багатьма дослідниками [10, 11, 42, 43, 56—58, 70, 74, 81, 111, 126, 152, 159]. Встановлено, що зазначені варіації істотно впливають на поведінку біосфери, самопочуття і здоров'я людини і, ймовірно, — на соціальні процеси. Через складність процесів, багатофакторність та синергетичність впливів у системі Космос — Земля канали впливу ВАП і ВКП вивчено недостатньо. Попереднім дослідникам бракувало системного підходу до дослід-

жуваної проблеми. Для виявлення механізмів і каналів впливу ВАП і ВКП необхідний системний підхід до системи Космос — Земля в цілому, до системи СМСМІАЗ і, звичайно, включення в цю систему біосфери і людини як підсистеми.

Добре відомо, що головною причиною ВКП, а частково й ВАП, є нестаціонарні процеси на Сонці. До них належать спалахи електромагнітного (рентгенівського, ультрафіолетового, радіо-) і корпускулярного випромінювань, СМЕ, дія ударної хвилі в сонячному вітрі, бомбардування магнітосфери плазмовими і магнітними хмарами сонячного походження.

Схему взаємодії підсистем в системі СМСМІАЗ показано на рис. 2. Видно вплив варіацій потоку сонячного вітру (сонячної активності) на прояв сонячно-кліматичних зв'язків (взаємодія двох погодних систем). Проміжною ланкою слугує модуляція потоків галактичних космічних променів (ГКП).

Як уже зазначалося, нестаціонарні процеси на Сонці, а особливо СМЕ, викликають геокосмічні бурі.

Іншими, менш інтенсивними або більш рідкісними причинами ВКП і ВАП космічного походження, є метеорні потоки і падіння досить великих космічних тіл. Метеорні потоки заносять в систему речовину з космосу, формують в іоносфері пилову плазму, нагрівають верхню атмосферу, створюють додаткову іонізацію і, що особливо важливо для біосфери, є джерелами інфразвукових хвиль.

Падіння великих космічних тіл здатні змінити не тільки космічну погоду, але й істотно вплинути на космічний клімат, викликати ефект «астероїдної зими», кардинально змінювати біосферу і навіть її знищити [95, 106]. Подібні катаклізми в історії Землі були. На щастя, що більшим є розмір космічного тіла, то рідше такі тіла стикаються із Землею. Наприклад, тіла, подібні до тунгуського, падають на Землю один раз за 100...300 років.

Падіння великих космічних тіл супроводжуються генерацією збурень електричного, магнітного, електромагнітного та інфразвукового полів, які істотно впливають на біосферу (людину).

5.6. Властивості систем. Властивості відкритих динамічних нелінійних систем кардинально

відрізняються від поведінки лінійних систем [45, 141]. Перерахуємо коротко ці властивості.

1. Складність процесів, множинність їхніх станів. При переході з одного стану в інший система зазнає біфуркацій. Важливо, що «інших» станів може бути кілька. У який з них перейде система, *априорі* не відомо. Структура траєкторій у фазовому просторі часто має фрактальні властивості.

2. Завдяки біфуркації еволюція детермінованої системи характеризується неоднозначністю. Вона може призвести до детермінованого (або динамічного) хаосу, особливо якщо система чутлива до малих змін початкових умов [113, 141]. Важливо, що такий хаос виникає вже в дуже простих, але неодмінно нелінійних відкритих динамічних системах. Досить, щоб розмірність фазового простору була не меншою трьох. Зі зміною параметрів, що описують стан системи, хаотичні режими можуть чергуватися з детермінованими.

У математичному плані детермінований хаос є результатом сильної чутливості розв'язків рівнянь, що описують динамічну систему, від початкових умов. Ця чутливість отримала назву ба-терфляй-ефекту (ефекту метелика). Вперше його було виявлено за допомогою комп'ютерного моделювання метеопроцесів у атмосфері Е. Лоренцом [45, 141].

3. У певному сенсі протилежністю детермінованому хаосу є самоорганізація, тобто виникнення порядку з безладу [141]. Процеси самоорганізації вивчає синергетика — теорія самоорганізації нелінійних відкритих дисипативних систем.

Строго кажучи, не буває ні абсолютного хаосу, ні абсолютного порядку. Самоорганізація і деградація — дві реалізації одного і того ж процесу. Система ЗАІМ перебуває в деякому проміжному стані, їй властиві як процеси деградації, так і процеси самоорганізації. Остання забезпечується, як правило, дисипацією енергії, речовини та негентропії (негативної ентропії).

Класичним прикладом самоорганізації є утворення в атмосфері упорядкованої хмарної структури. Подібні структури в лабораторних умовах називають комірками Бенара [141].

4. Поява нових властивостей у системі (властивість емергентності). Ясно, що система має

властивості підсистем. Нетривіальним є те, що у неї можуть виникати властивості, не притаманні підсистемам. Тому для адекватного вивчення системи потрібний системний підхід.

5. Спускні механізми. Однією з особливостей нелінійних систем є принципова можливість прояву спускного (тригерного) механізму вивільнення енергії. При досягненні певного порогу енергія, накопичена в одній з підсистем, вивільняється в іншій підсистемі. Важливо, що енергія вторинних процесів може бути більшою (і навіть значно більшою) за енергію первинних процесів [93, 94, 98, 105].

6. ЕНЕРГЕТИКА ПРОЦЕСІВ

6.1. Енергетика сонячних процесів. Сонце — основне джерело енергії на Землі.

Електромагнітне випромінювання Сонця. Повна потужність P_S його випромінювання становить близько $4 \cdot 10^{26}$ Вт [80]. Приблизно $4 \cdot 10^{17}$ Вт «перехоплюється» нашою планетою. Цій величині P_S відповідає потік 1.4 кВт/м². Велика частина P_S доводиться на оптичний діапазон (в незбурених умовах близько $3 \cdot 10^{17}$ Вт), а на УФ-діапазон — $4 \cdot 10^{16}$ Вт. Лише близько 10^{-4} частини останньої витрачається на іонізацію атмосфери. Потужність рентгенівського випромінювання — порядку 10^6 Вт; цього достатньо для забезпечення іонізації основи іоносфери (тут в денний час концентрація електронів $n_{sw} \sim 10^8$ м⁻³).

Сонячний вітер. Крім електромагнітного випромінювання, від Сонця відходить сонячний вітер, що є потоком плазми з вмороженим в неї магнітним полем. У незбурених умовах $n_{sw} \approx 5 \cdot 10^6$ м⁻³, швидкість частинок $V_{sw} = 3 \cdot 10^5$ м/с. Вітер має потужність

$$P_{sw} = n_{sw} V_{sw} \varepsilon_p S_m, \quad (1)$$

де $\varepsilon_p \approx 10^{-16}$ Дж — енергія протонів, $S_m \approx 10^{16}$ м² — площа перерізу магнітосфери з характерним розміром близько $10R_E$ (R_E — радіус Землі). Оцінки за співвідношенням (1) дають $P_{sw} \approx 10^{12}$ Вт.

У збуреному сонячному вітрі $n_{sw} = 10^7 \dots 10^8$ м⁻³, $V_{sw} \approx 10^6$ м/с, $\varepsilon_p \approx 10^{-15}$ Дж. При цьому, як випливає зі співвідношення (1), $P_{sw} = 10^{14} \dots 10^{15}$ Вт.

Додамо, що енергетика теплового руху частинок в сонячному вітрі і міжпланетного магнітно-

го поля на 1...2 порядки менша від енергетики кінетичного руху.

6.2. Енергетика сонячних і геокоосмічних бур.

Важливими для фізики системи СМСМІАЗ (СМСМІАЗБ) є, зокрема, нестационарні процеси на Сонці (сонячні бурі). Бурі супроводжуються спалахами і СМЕ — потужними проявами сонячної активності.

Енергетика сонячних спалахів. Енергія сильних спалахів досягає 10^{25} Дж, а потужність — 10^{22} Вт. На орбіті Землі спалахам відповідають значення порядку 10^{16} Дж, 10^{13} Вт (для площі перерізу Землі $S_e \approx 10^{14}$ м²) і 10^{18} Дж, 10^{15} Вт (для S_m). Складові цих енергетичних характеристик для сильного спалаху наведено в табл. 1. Для слабого спалаху (або субспалаху) ці параметри на 2...3 порядки менші.

За нашими оцінками, енергія екстремального сонячного спалаху може досягти 10^{28} Дж, а потужність — 10^{25} Вт.

Енергетика корональних викидів маси. Маса викинутої речовини становить $10^{12}...10^{13}$ кг, швидкість — $(1...3) \cdot 10^6$ м/с. Кінетична енергія викидів порядку $10^{24}...10^{26}$ Дж. При тривалості процесу $10^3...10^4$ с його потужність близька до $10^{20}...10^{23}$ Вт.

Для екстремального викиду маса становить $2 \cdot 10^{14}$ кг, швидкість — $3 \cdot 10^6$ м/с, тобто кінетична енергія викиду дорівнює 10^{27} Дж, а потужність — $10^{23}...10^{24}$ Вт.

Енергетика міжпланетного магнітного поля. Ефективність енергетичного зв'язку між сонячним вітром і магнітосферою описується за допомогою енергетичної функції С. І. Акасофу [65]:

$$\varepsilon_A = 4S_m V_{sw} \frac{B_{IMF}^2}{\mu_0} \sin^4 \frac{\theta}{2},$$

де B_{IMF} — індукція міжпланетного магнітного поля, $\theta = \arctg(B_y/B_z)$ — кут повороту вектора індукції відносно площини екліптики, μ_0 — маг-

Таблиця 1. Енергетичні характеристики складових сонячної бурі біля орбіти Землі

Переносник	Енергія, Дж	Потужність, Вт
Випромінювання (стосується S_e)		
м'яке рентгенівське і ультрафіолетове оптичне	$(3...5) \cdot 10^{15}$	$(3...5) \cdot 10^{12}$
жорстке рентгенівське	$(1...3) \cdot 10^{15}$	$(1...3) \cdot 10^{12}$
гамма	$(3...5) \cdot 10^{10}$	$(3...5) \cdot 10^7$
радіо	$(1...3) \cdot 10^9$	$(1...3) \cdot 10^6$
	10^8	10^5
Частинки високих енергій (стосується S_m)		
електрони ($\varepsilon_e \geq 20$ кеВ)	$(3...5) \cdot 10^{17}$	$(3...5) \cdot 10^{14}$
протони ($\varepsilon_p \geq 20$ МеВ)	$(1...3) \cdot 10^{17}$	$(1...3) \cdot 10^{14}$
Корональні викиди маси	$10^{24}...10^{26}$	$10^{20}...10^{23}$
Ударні хвилі	$(1...3) \cdot 10^{18}$	10^{15}

Таблиця 2. Енергетичні характеристики геокоосмічних бур

Область геокоосмосу	Енергія, Дж	Потужність, Вт	Тривалість, с	Відносні зміни енергії	Примітка
Магнітосфера	$10^{16}...10^{17}$	$10^{12}...10^{13}$	10^4	0.01...0.1	Енергія магнітного поля
	$10^8...10^{10}$	$10^4...10^6$	$10^4...10^5$	$10^2...10^4$	Енергія електричного поля
Іоносфера	10^{12}	10^8	10^4	± 1	Теплова енергія
	$10^5...10^7$	$10...10^3$	$10^4...10^5$	$10^2...10^4$	Енергія електричного поля
Термосфера	$10^{15}...10^{17}$	$10^{11}...10^{13}$	$10^4...10^5$	0.001...0.1	Теплова енергія
Приземна атмосфера	$10^{11}...10^{12}$	$10^6...10^8$	$10^4...10^5$	1...10	Енергія атмосферного електричного поля

нітна стала. Вважаючи $\sin^2(\theta/2) = 1$, отримаємо оцінку

$$\varepsilon_{A_{\max}} = 4S_m V_{sw} \frac{B_{IMF}^2}{\mu_0}.$$

При $S_m \approx 10^{16} \text{ м}^2$, $V_{sw} \approx 3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$, $B_{IMF} \approx 30 \text{ нТл}$ маємо $\varepsilon_{A_{\max}} \approx 10^{14} \text{ Дж/с}$. Часто $\theta \ll 1$. Наприклад, при $\theta/2 = 0.1$ маємо значення $\varepsilon_A \approx 10^{10} \text{ Дж/с}$.

Енергетика геокосмічних бур. Сонячні бурі в околиці Землі викликають геокосмічні бурі. Енергетичні характеристики геокосмічної бурі наведено в табл. 2 [91, 93, 105]. Видно, що у процесі розвитку бурі найбільше змінюється енергія електричного поля у всіх зовнішніх оболонках Землі. Істотно також змінюється теплова енергія іоносфери. Магнітні збурення зазвичай невеликі, але їхня роль може бути значною.

7. ВІД БУР НА СОНЦІ ДО БУР НА ЗЕМЛІ

7.1. Сонячні бурі. Потоки випромінювання, частинок і плазми. Параметри верхньої атмосфери Землі і процеси, що протікають в ній, визначаються головним чином варіаціями надходжень сонячної і магнітосферної енергії [4, 5, 19–21, 60, 61, 76, 77, 120, 157, 158]. Ці варіації керуються процесами на Сонці, які часто супроводжуються сонячними бурями, спалахами і СМЕ. Спалахи виникають над фотосферою, у верхніх шарах атмосфери Сонця. Вони розвиваються на ділянках зі складною конфігурацією сонячного магнітного поля і зазвичай прив'язані до лінії, що розділяє поля з протилежними полярностями. Під час спалаху відбувається раптове руйнування струмового шару, що розділяє протилежно напрямлені магнітні поля, яке супроводжується вибуховим виділенням значної кількості енергії ($10^{25} \dots 10^{26} \text{ Дж}$) за порівняно короткий час ($\sim 10^3 \text{ с}$).

Оптично буря проявляється як раптове збільшення яскравості випромінювання в лінії H_{α} сонячного спектру, а іноді і у видимій його частині. Цей ефект називають сонячним спалахом, але це тільки одне з багатьох складних явищ, пов'язаних із сонячною бурею. Спалах супроводжується інтенсивним електромагнітним випромінюванням: рентгенівським, ультрафіолетовим і радіовипромінюванням. Електромагнітне випромінювання Сонця досягає іоносфери Землі

приблизно через 8 хв після спалаху і викликає раптові іоносферні збурення (РІЗ). Вони проявляються у збільшенні іонізації в D- і E-областях на всій освітленій стороні Землі, переважно за рахунок зростання інтенсивності рентгенівського випромінювання (в десятки і сотні разів), що призводить до поглинання відбитих від шарів E і F сигналів декаметрового радіодіапазону і викликає їхнє завмирання, або федінг.

Сонячні спалахи — це найбільш бурхливі явища, пов'язані з центром активної області Сонця. Однак в різних частинах сонячного диска постійно розвиваються і згасають кілька центрів активності. У кожній секторній структурі постійно змінюються щільність сонячного вітру, його швидкість і напруженість міжпланетного магнітного поля. Такі зміни також можуть викликати магнітні бурі і пов'язані з ними зміни магнітного і електричного полів Землі, іоносфери і термосфери. Як вже зазначалося, ці збурення в системі Сонце — Земля є ланцюжком взаємопов'язаних подій єдиного процесу — геокосмічної бурі. Енергетика цих збурень велика (див. табл. 2).

Якщо розвиток нестійкості на Сонці відбувається у струмовому шарі, який розділяє незамкнуті силові лінії, що з'єднують фотосферу з сонячним вітром, відбувається викид з Сонця енергійних протонів з енергіями порядку від 1 кеВ до більш ніж 10 ГеВ. Такі спалахи називають протонними. Вони призводять до сонячних протонних явищ. Високоенергійні протони проходять відстань до Землі за час від десятків хвилин до декількох годин в залежності від їхньої енергії і траєкторії поширення від Сонця до Землі. В результаті магнітосфера Землі виявляється оточеною потоком енергійних частинок. Їхня частина проникає у полярну атмосферу, іонізує її на висотах D-області і викликає поглинання у полярній шапці (ППШ), яке порушує проходження радіохвиль аж до повного припинення радіозв'язку (блекаут).

7.2. Бурі у міжпланетному середовищі. За енергійними частинками йде хмара сонячної плазми, яка долає міжпланетний простір зі швидкістю 500...1500 км/с і досягає земної орбіти за 30...40 год. Плазмову хмару трохи випереджає між-

планетна ударна хвиля, що генерується в сонячному вітрі, інтенсивність якого під час бурі також різко зростає. При зіткненні міжпланетної ударної хвилі і сонячної плазми з магнітосферою Землі починається магнітна буря (буря у магнітосфері). Енергетичні характеристики джерел, пов'язаних з геокоосмічних бурею, наведено в табл. 3.

7.3. Магнітні бурі. Типова магнітна буря складається з трьох фаз [4, 5, 19—21, 60, 76, 77, 120, 157, 158]. Вона починається у момент часу, коли міжпланетна ударна хвиля досягає магнітосфери і впливає на неї. Результатом взаємодії є модифікація ударних хвиль, зміна параметрів потоку на фронті хвилі, збурення системи електричних струмів, що течуть по магнітопаузі, і стиснення (компресія) магнітосфери. Ефект компресії проявляється у зсуві положення головної ударної хвилі у бік Землі на кілька планетних радіусів і, як результат, — у різкому збільшенні напруженості магнітного поля на поверхні Землі і у магнітосфері. Описані ефекти належать до початкової фази магнітосферної бурі. Після раптового початку бурі, як правило, настає досить спокійний період тривалістю від кількох хвилин до кількох годин.

Головна фаза бурі починається тоді, коли магнітосфери досягають збурення, згенеровані сонячною бурею, що призводить до початку розпаду кільцевого струму. Відповідний інтервал часу визначається по інтервалу часу, де індекс $D_{st} > 0$. Головна фаза характеризується послідов-

ністю вибухоподібних процесів, які називаються магнітосферними суббурями. Вони пов'язані з турбулентністю плазмової хмари та іррегулярністю північно-південної складової перенесеного нею міжпланетного магнітного поля (ММП) з індукцією **В**. При південній орієнтації вектора **В** відбувається через'єднання силових ліній ММП і земного магнітного поля, що призводить до появи електричного поля **Е**, спрямованого поперек хвоста магнітосфери з ранкового її боку до вечірнього.

Електричне поле **Е** викликає інтенсивний, спрямований до Сонця конвективний рух плазми у хвості і плазмосфері. У хвості відбувається перерозподіл плазми, магнітного поля і струмів. Струми, спрямовані з хвоста магнітосфери, призводять до посилення полярного електроструменя і електричного струму, який тече уздовж овалу полярних сьайв. Конвекція магнітосферної плазми до Землі і струми вздовж силових ліній призводять до прискорення заряджених частинок. Виникає надзвичайно гаряча плазма з температурою близько 10^7 К чи більше. Частина її вторгається у верхню атмосферу високих широт. Інша частина проникає у плазмовий шар, частково інjektується в область захоплення і заповнює під час бурі радіаційні пояси: протонний пояс (так званий кільцевий струм) і зовнішній радіаційний пояс (електронний). Захоплені частинки (протони й електрони) у поясах мають великі енергії. Послідовність кількох суббур призводить до генерації інтенсивного кільцево-

Таблиця 3. Енергетичні характеристики джерел, пов'язаних з геокоосмічною бурею. Відносна зміна потужності нормувалася на незбурене значення

Джерело	Енергія, Дж	Потужність, Вт	Тривалість, с	Відносні зміни енергії	Примітка
Сонячний вітер (збурений)	$10^{18} \dots 10^{20}$	$10^{14} \dots 10^{15}$	$10^4 \dots 10^5$	$10^2 \dots 10^3$	Швидкість 500...1500 км/с, концентрація плазми $10^7 \dots 10^8 \text{ м}^{-3}$
Висипувані високоенергійні частинки	$10^{12} \dots 10^{14}$ $10^{10} \dots 10^{12}$	$10^9 \dots 10^{10}$ $10^7 \dots 10^8$	$10^3 \dots 10^4$ $10^3 \dots 10^4$	$10 \dots 10^2$ $10 \dots 10^2$	Високі широти, потоки енергії $10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ Середні широти, потоки енергії $10^{-6} \dots 10^{-5} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
Джоулівська дисипація	$10^{13} \dots 10^{15}$	$10^{11} \dots 10^{12}$	$10^2 \dots 10^3$	1...10	Високі широти, електричне поле 0.1 В/м, щільність струму $10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ А}/\text{м}^2$
Термосферний вітер	$10^{13} \dots 10^{15}$	$10^9 \dots 10^{10}$	$10^4 \dots 10^5$	1...10	Швидкість вітру 50...100 м/с

го струму, магнітне поле якого відповідальне за зниження горизонтальної H -складової геомагнітного поля і формування головної фази бурі.

Гаряча плазма, інжектвана у високоширотні області, збуджує полярну іоносферу і викликає полярні суббурі. Вторгнення в атмосферу енергійних частинок супроводжується полярними сьйвами — світінням іоносфери на висотах 100...150 км. Область, зайнята полярними сьйвами, оточує геомагнітний полюс у вигляді полярного овалу (геомагнітна широта $68^\circ \dots 78^\circ$). Висипання з магнітосфери електронів з енергіями $E_e \approx \approx 20$ кеВ викликає додаткову іонізацію в області D і так зване авроральне поглинання радіохвиль. Область аврорального поглинання зміщена у бік середніх широт у порівнянні з зоною полярних сьйв. Як і всі авроральні явища, з ростом магнітної активності вона зміщується до екватора.

Збурення з високих широт поширюються в середні і низькі широти. Розширення високоширотної області іоносфери, охопленої конвекцією, веде до зменшення розміру плазмосфери і до зміщення головного іоносферного провалу на нижчі геомагнітні широти. Посилення і наближення до Землі кільцевого струму в головну фазу бурі супроводжується збільшенням потоків тепла в іоносферу з периферійної «гарячої зони» плазмосфери, де температура плазми становить кілька десятків тисяч кельвін. Її наявність зумовлена взаємодією енергійних протонів кільцевого струму з холодною фоновою плазмою за допомогою збудження і дисипації іонно-циклотронних хвиль. Приплив тепла до електронного газу області F іоносфери витрачається на збільшення його температури, а також на збудження електронних станів атомів кисню з подальшим їхнім висвічуванням (червоні дуги) і на збудження коливальних рівнів молекул азоту. Останній процес прискорює хімічну реакцію, відповідальну за втрату іонів кисню, що домінують в області F, і призводить до зменшення електронної концентрації у ній.

Посилення електричних полів і підвищення провідності за рахунок висипань енергійних частинок під час магнітних бур зумовлюють зростання струмів у високоширотній іоносфері і джоулівське нагрівання заряджених і нейтраль-

них складових атмосфери. Просторова неоднорідність і нестационарність нагріву нейтрального газу ведуть до генерації рухів різних масштабів (вітрів і внутрішніх гравітаційних хвиль). Вони викликають перебудову глобальної термосферної циркуляції і змінюють нейтральний склад, підвищуючи відносний вміст молекулярних складових термосфери в середніх широтах. Ця обставина разом зі збільшенням іонної температури і температури нейтрального газу прискорює втрати іонів кисню, що призводить до значного зменшення електронної концентрації в області F і розвитку негативної іоносферної бурі. Крім того, під час збурень магнітосферні електричні поля можуть проникати з полярних широт у середні і низькі широти, порушуючи процеси вертикального перенесення плазми і викликаючи її перерозподіл. Так процеси у високоширотній іоносфері впливають на поведінку плазми на значній відстані від неї.

Початкова і головна фази магнітної бурі супроводжуються генерацією спорадичного радіовипромінювання [64].

Після головної фази бурі настає фаза відновлення. У міру ослаблення припливу енергійних частинок в область захоплення кільцевий струм поступово зменшується. Протягом одного-двох днів частинки можуть як прискорюватися, так і виходити з радіаційних поясів [197]. Геомагнітне поле поступово повертається до свого звичайного значення. Характер протікання геомагнітних бур дуже різноманітний. Окремі фази бурі можуть мати різну тривалість або взагалі бути відсутніми.

7.4. Енергетика магнітної бурі. Оцінімо енергетику магнітної бурі. Її енергія E_{ms} визначається значенням індексу $D_{st\min}^*$ [151]:

$$E_{ms} = \frac{3}{2} E_m \frac{|D_{st\min}^*|}{B_0}, \quad (2)$$

де $B_0 \approx 3 \cdot 10^{-5}$ Тл — значення індукції магнітного поля на екваторі, $E_m \approx 8 \cdot 10^{17}$ Дж — енергія дипольного магнітного поля Землі. Скориговане значення

$$D_{st\min}^* = D_{st\min} - b p_{sw}^{1/2} + c. \quad (3)$$

Тут $b = 5 \cdot 10^5$ нТл(Дж $^{-1}$ м 3) $^{1/2}$, $c = 20$ нТл, $p_{sw} = = n_p m_p V_{sw}^2$, n_p і m_p — концентрація і маса протонів, V_{sw} — швидкість сонячного вітру.

Для вкрай сильної бурі (за класифікацією [87, 91–94, 105, 138]) або екстремальної магнітної бурі (за класифікацією NOAA) при $D_{st\min} \approx -600$ нТл, $n_p \approx 10^8$ м⁻³, $V_{sw} \approx 1500$ км/с маємо $p_{sw} \approx 4 \cdot 10^{-7}$ Дж/м³. При цьому із співвідношень (2) і (3) отримуємо, що $D_{st\min} \approx -900$ нТл, $E_{ms} \approx 3.6 \cdot 10^{16}$ Дж. Можна грубо вважати, що $D_{st\min}^* \approx 3D_{st\min} / 2$. Енергія вкрай сильної магнітної бурі еквівалентна енергії термоядерної бомби в 10 Мт ТНТ. Якщо тривалість основної фази $\Delta t = 6$ год, то потужність бурі $P_{ms} \approx 1.7 \cdot 10^{12}$ Вт.

8. ЕФЕКТИ НАДСИЛЬНОЇ ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ

Як приклад розглянемо ефекти геокосмічної бурі 7...10 листопада 2004 року, однієї із найсильніших у XXI столітті [91].

8.1. Загальні відомості. Ефекти сонячної бурі і процеси у магнітосфері, що мали місце 7...10 листопада 2004 р., детально описано в роботі [44].

Дослідженню проявів ГБ в іоносфері присвячено значну кількість робіт (див. огляди [129, 151, 189, 198, 203]). У більшості з них аналізувалися процеси в середній і верхній іоносфері (вище 100 км) [38, 40, 143], що дозволило порівняно добре зрозуміти особливості протікання ІБ на цих висотах. Ефекти в нижній іоносфері (50...90 км) під час бур, за винятком полярних областей, вивчені досить слабо [9, 27, 66, 140]. Це пояснюється нерегулярністю і епізодичністю прямих вимірювань, виконаних за допомогою ракетних методів, і великими труднощами при використанні непрямих дистанційних методів особливо при дослідженні середньоширотної нижньої іоносфери в нічний час і на висотах 50...60 км. Необхідність дослідження даної іоносферної області викликана відмінностями у проявах ГБ в нижній і верхній іоносфері, зумовленими різними фізико-хімічними процесами [9, 27, 66].

Метою цього розділу є аналіз варіацій параметрів як нижньої, так і верхньої іоносфери, а також рівня флуктуацій геомагнітного поля під час надсильної ГБ 7...10 листопада 2004 р., отриманих за допомогою радарів часткового відбиття і некогерентного розсіяння, цифрового іонозонда, а також магнітометричних вимірювань [30, 31, 33–35, 66, 137].

8.2. Засоби і методи спостереження. Вивчення відгуку нижньої іоносфери на ГБ проводилося за допомогою радара часткового відбиття (ЧВ), розташованого в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (ХНУ), її географічні координати: 49°38' пн. ш., 36°20' сх. д., магнітні координати: +53.6°, 127°. Технічні характеристики радара і режими його роботи детально описані в роботах [23, 24, 86]. Тут відзначимо, що зондування D-області іоносфери провадилося радіоімпульсами тривалістю 25 мкс з частотою заповнення $f = 2.2...2.4$ МГц і частотою повторення $F = 10$ Гц. В експерименті реєструвалися оригінальні звичайної і незвичайної складових розсіяних неоднорідностями радіосигналів і радіозавад. Вимірювання проводилися безперервно з 12:30 UT 8 листопада до 14:30 UT 13 листопада 2004 р. Визначення електронної концентрації виконувалося за допомогою методики диференціального поглинання. Для дослідження параметрів хвильових збурень (ХЗ) використовувалися активний і пасивний методи, описані в роботах [66].

Дослідження середньої і зовнішньої іоносфери в Харкові провадяться за допомогою радара некогерентного розсіяння (НР), розташованого в обсерваторії Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки (географічні координати: 49°36' пн. ш., 36°18' східної довготи, геомагнітні координати: +45.7°, 117.8°).

Іоносферна станція «Базис» служить для отримання іонограм вертикального зондування (ВЗ) і вимірювання критичної частоти f_oF_2 шару F2 іоносфери з метою калібрування профілю концентрації електронів, одержуваного методом некогерентного розсіяння.

Реєстрація флуктуацій рівня H- і D-складових геомагнітного поля здійснювалася за допомогою високочутливого магнітометра-флюксометра, розташованого в обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна (географічні координати: 49°39' с. ш., 36°56' сх. д., магнітні координати: +45°20', 119°20').

8.3. Процеси в системі Сонце — міжпланетне середовище — геокосмос. Результати супутникових і наземних спостережень подій в системі

СМСМІАЗ під час протікання даної ГБ, у попередній і наступний періоди часу докладно описані в роботі [44]. Далі ми зупинимося лише на кількох важливих явищах і процесах.

8.3.1. *Процеси на Сонці.* Надсильній ГБ передували високоенергетичні процеси на Сонці в активній області 696 (N09, $L = 026$). За час її обертання були зареєстровані ряд оптичних і рентгенівських спалахів, з яких тринадцять класу М та два класу X, а також велика кількість великих СМЕ (табл. 4).

3 листопада мали місце чотири інтенсивні спалахи бала M2.8, M1.6, M5.0, M1.0, 4 листопада — два спалахи M2.5 і M5.4, 5 листопада — два спалахи M4.0 і M1.2, 6 листопада — чотири спалахи M9.3, M5.9, M3.6, M1.4, 8 листопада — спалах M2.3, 9 листопада — M8.9, а також дуже інтенсивні спалахи 7 листопада бала X2.0 і 10 листопада бала X2.5, останній став найзначнішою подією за час життя АО 696 на Сонці. Спалахи супроводжувалися СМЕ типу повного або часткового гало різної складності і конфігурації, магнітних хмар, інтенсивними сплесками радіовипромінювання, високошвидкісними потоками плазми, що витікають з корональних дір, змінами динамічного тиску сонячного вітру, деформацією перенесеного ним міжпланетно-

го магнітного поля (ММП). 9 листопада спалах M8.9 супроводжувався СМЕ типу «повного гало» зі швидкістю 1800 км/с. Швидкість руху сонячної плазми під час найінтенсивнішого спалаху X2.5 10 листопада з викидом СМЕ типу «асиметричного повного гало» досягла 2000 км/с. До 11 листопада активність області 696 значно зменшилася, а 12 листопада вона перемістилася на зворотний бік сонячного диска. Детальний опис сонячної спалахової і вулканічної активності в листопаді 2004 р., викликаній збуренням у міжпланетному середовищі та у магнітосфері, дано в роботах [44, 91].

8.3.2. *Стан космічної погоди. Загальні відомості.* Для опису стану космічної погоди автором розроблено спеціальний формат (рис. 3). У верхній частині рисунка наводяться часові варіації параметрів сонячного вітру; в середній частині — B_z -складової і модуля індукції міжпланетного магнітного поля; енергії, що передається сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу; H_p -складової геомагнітного поля; а в нижній частині — високоширотного індексу AE ; екваторіального індексу D_{st} і планетарного індексу K_p .

Параметри, що визначають стан космічної погоди 7...13 листопада 2003 р., наведені на рис. 3. На супутнику ACE 7 листопада о 02:00 UT заре-

Таблиця 4. Відомості про активність Сонця за період 1...13 листопада 2004 р. (дані супутника GOES [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/])

Дата, листопад 2004 р.	$F_{10.7}$	Кількість сонячних плям	Площа сонячних плям, 10^{-6}	Рентгенівське випромінювання (фон)	Кількість рентгенівських спалахів			Кількість оптичних спалахів				
					C	M	X	S	1	2	3	4
1	136	144	1160	B3.3	2	1	0	1	1	0	0	0
2	133	110	1070	B5.1	7	0	0	2	0	0	0	0
3	136	123	1240	B5.4	11	4	0	6	3	0	0	0
4	136	135	1300	B4.5	6	2	0	2	1	0	0	0
5	141	83	1400	B4.9	10	2	0	6	1	0	0	0
6	129	106	1370	B4.3	6	4	0	2	3	1	0	0
7	130	94	980	B 4.9	12	0	1	6	0	0	0	0
8	124	93	870	B 4.9	5	1	0	10	2	0	0	0
9	127	90	980	B 7.0	6	1	0	4	0	1	0	0
10	105	50	500	B 5.2	8	0	1	1	0	0	2	0
11	95	70	550	B 2.1	1	0	0	1	0	0	0	0
12	97	52	230	B 1.3	0	0	0	0	0	0	0	0
13	96	50	220	B 1.0	0	0	0	0	0	0	0	0

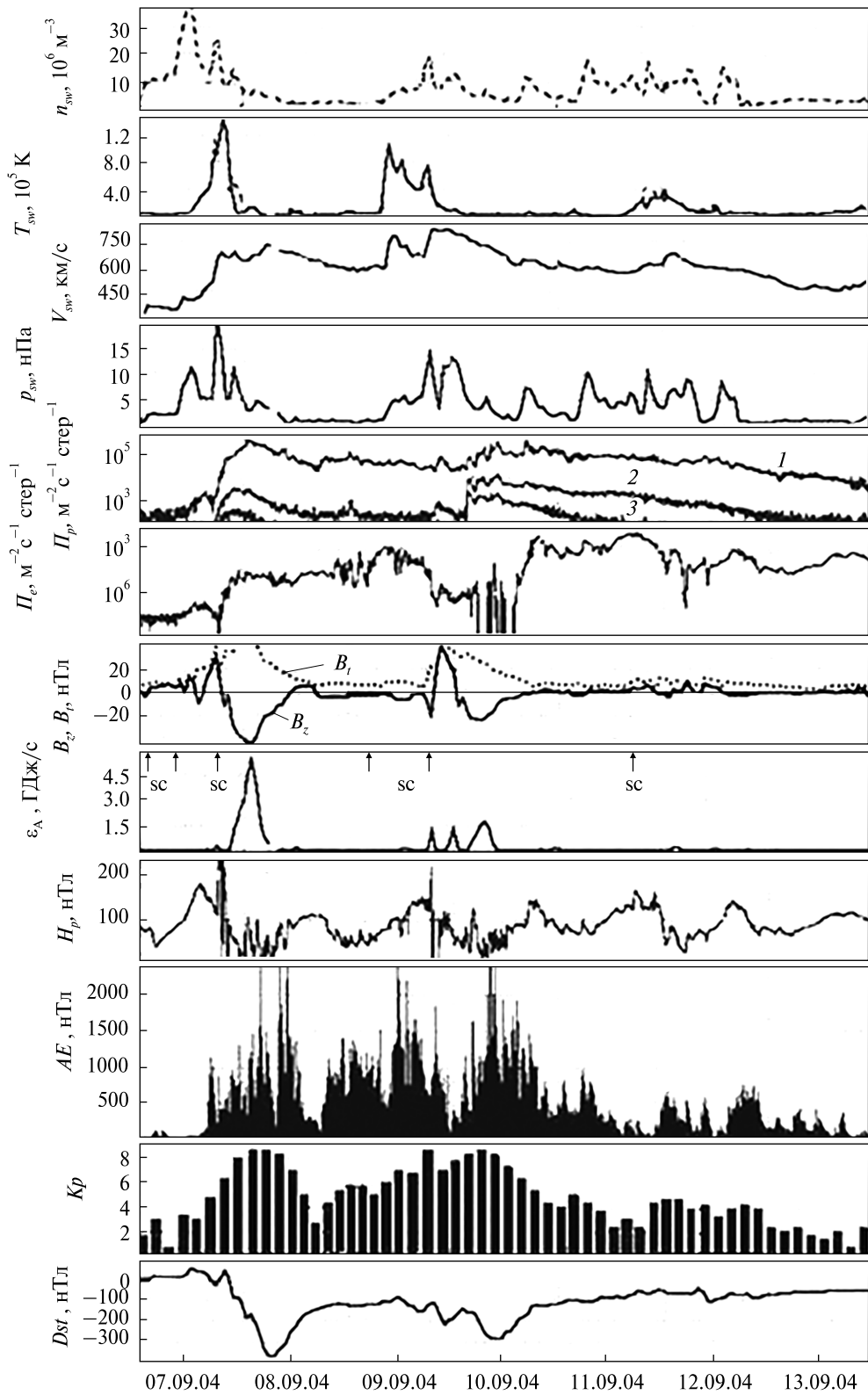


Рис. 3. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряних значень концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} і розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряні щільності Π_p потоку протонів (криві 1, 2 і 3 — для енергій $E \geq 10$, $E \geq 50$ і $E \geq 100$ MeV відповідно) і електронів з енергією $E \geq 2$ MeV (Π_e) (дані супутника GOES), складової B_z і модуля міжпланетного магнітного поля B_t (точки); розрахованих значень енергії ϵ_A ; H_p -складової геомагнітного поля; AE -індексу, K_p -індексу і D_{st} -індексу у період 7...13 листопада 2004 р. Стрілками на горизонтальній осі відзначено моменти SC початку суббурь

естровано прихід першої з шести міжпланетних ударних хвиль, утворених хмарами СМЕ, що виникли під час спалахів 3, 4 і 5 листопада. Проходження наступних двох хвиль спостерігалися о 10:00 UT та 17:55 UT. Вони призвели до найсильнішої першої МБ 7-8 листопада з мінімальним значенням індексу $D_{st} = -383$ нТл, яке було зареєстроване 8 листопада о 07:00 UT. З приходом ударних хвиль пов'язаний раптовий початок (SC) трьох окремих бур. SC були зареєстровані 7 листопада як сплески геомагнітного поля у Боулдері зі значеннями індукції 7 нТл о 2:58 UT, 35 нТл о 11:13 UT і близько 41 нТл о 18:31 UT [http://solar.sec.noaa.gov/weekly], а також як позитивні сплески індексу D_{st} (http://swdcd.kugi.kyoto-u.ac.jp) до значень +12 нТл близько 4:00 UT, +51 нТл о 13:00 UT та +42 нТл о 20:00 UT (на рис. 3 дані наведено з часовим розрізненням 1 год). Ці події свідчили про складний характер міжпланетних збурень, пов'язаних з проходженням і накладенням серії СМЕ, що появилися протягом початкового періоду високої активності області 696. У цей період зареєстровано збільшення радіальної швидкості V_{sw} сонячного вітру (зокрема від 310 до 700 км/с 7 листопада), температури T_{sw} і концентрації n_{sw} сонячної речовини, динамічного тиску p_{sw} , яке досягло 20 нПа при проходженні через супутник ACE третьої ударної хвилі о 17:55 UT (див. рис. 3), а також деформація ММП, супроводжувана значними флуктуаціями, збільшенням модуля B_t до 45 нТл і різким поворотом B_z -складової на південь близько 18:30 UT. Значення B_z досягло мінімуму -45 нТл 8 листопада о 02:00 UT і залишалось негативним до полудня.

Сильне збурення змінило спокійне магнітне поле: опівночі 6—7 листопада $K_p \approx 1.7$, в наступну ніч $K_p \approx 8.0, 8.7, 8.7$ і 8.3 протягом чотирьох 3-годинних інтервалів відповідно. Фаза відновлення першої бурі розпочалася 8 листопада після 7:00 UT (див. графік D_{st} на рис. 3). На її плавне протікання наклався початок наступної бурі 9-10 листопада. 9 листопада ударна хвиля була зареєстрована на супутнику ACE о 09:13 UT, а потім — о 18:18 UT. Перша хвиля була слабкою, хоча вона викликала збільшення V_{sw} від 600 до більш ніж 750 км/с при незначних змінах модуля

ММП B_t і B_z -складової (див. рис. 3). Хвиля могла бути пов'язана з накладенням СМЕ, які утворилися 6 листопада під час двох спалахів М3.6 і М9.3 і поширювалися з різними швидкостями. Друга ударна хвиля супроводжувалася збільшенням V_{sw} від 675 до 825 км/с і поворотом на південь B_z -складової, яка досягла значення -25 нТл 10 листопада близько 06:00 UT і зберігала південний напрямок приблизно до 18:00 UT.

У Боулдері 9 листопада о 18:52 був зафіксований новий сплеск геомагнітного поля до 46 нТл, після чого супутники GOES-10 і GOES-12 перетнули магнітопаузу, що свідчило про стиснення магнітосфери. Ці ефекти, ймовірно, були пов'язані зі спалахом бала X2.0 7 листопада. Головна фаза другої бурі протікала на тлі значних флуктуацій параметрів сонячного вітру, індексу D_{st} , значення якого досягло мінімуму (-289 нТл) 10 листопада о 10:00...11:00 UT. Активний період бурі був тривалим, значення $K_p \approx 6$ спостерігалися з 12:00 UT 9 листопада до 18:00 UT 10 листопада. Фаза відновлення тривала щонайменше до кінця вимірювань. Нарешті, 11 листопада о 17:14 UT у Боулдері був зареєстрований ще один стрибок поля до 12 нТл. Йому передувало проходження через супутник ACE слабкої хвилі, пов'язаної, ймовірно, з СМЕ, що утворився 9 листопада під час спалаху М8.9. У цей день почався другий період спалахової активності Сонця, викликаний утворенням нового потоку плям в АО 696. До цього періоду відноситься і найінтенсивніший спалах X2.5, що відбувся 10 листопада. Однак ці події не призвели до значних магнітосферних чи геомагнітних збурень. До 12 листопада параметри сонячного вітру почали відновлюватися, складова B_z повернула на північ, досягнувши значення $+5$ нТл, геомагнітне поле поступово поверталося до норми.

Спалахи супроводжувалися викидами енергійних частинок. Потік протонів з енергією $E_p > 10$ МеВ спостерігався з 19:10 UT 7 листопада до 16:00 UT 13 листопада. Щільність потоку досягла максимуму $4.6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{стер}^{-1}$ 8 листопада о 01:15 UT (див. рис. 3). Посилення потоку протонів з $E_p > 100$ МеВ було зафіксовано в ніч 7-8 листопада. Ці події були пов'язані зі спалахом X2.0 7 листопада. 10 листопада спостерігався

лося нове вторгнення високоенергійних протонів, викид яких супроводжував спалах X2.5 в 2:13 UT. При цьому другий максимум щільності потоку протонів з $E_p > 10$ МеВ був зафіксований 10 листопада о 16:55 UT, а потік протонів з $E_p > 100$ МеВ спостерігався з 3:20 UT до 12:50 UT. Щільність потоку електронів з енергіями $E_e > 2$ МеВ мала високі значення (див. рис. 3).

Коливання H_p -складової геомагнітного поля під час магнітної бурі були значні (від 0 до 240 нТл) і корелювали з варіаціями динамічного тиску сонячного вітру p_{sw} (див. рис. 3). На тлі магнітних збурень 7...10 листопада зареєстровано послідовність інтенсивних суббур, при яких авроральний індекс AE досягав значень 1500...2500 нТл, тоді як перед початком бурі 7 листопада $AE \approx 0$. З рис. 3 видно, що енергія, яка передається сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу (енергетична функція Акасофу ε_A), досягала високих значень $\varepsilon_A \approx 6 \cdot 10^{11}$ і $1.5 \cdot 10^{11}$ Дж/с під час першої та другої бур відповідно. Зауважимо для порівняння, що під час двох сильних магнітних бур 25 вересня 1998 р. ($K_{pmax} = 8.3$) і 29-30 травня 2003 року ($K_{pmax} = 8.3$) надходження енергії у магнітосферу Землі були значно меншими: $\varepsilon_A \approx 10^{11}$ і $0.75 \cdot 10^{11}$ Дж/с відповідно.

Інжекція енергії. При дослідженні енергетичного внеску процесів, які супроводжують ГБ, в іоносферу були проаналізовані часові залежності ряду величин, представлені на рис. 4, а. Енергетична функція Акасофу ε_A , що визначає вплив енергії від міжпланетного магнітного хмари в замкнуту магнітосферу, обчислювалася з виразу [49, 65, 73]

$$\varepsilon_A = \frac{V_{sw} B_t^2 \sin^4(\theta/2)}{\mu_0} R_{ef}^2,$$

де

$$\theta = \begin{cases} \arctg(B_y / B_z) & \text{при } B_y / B_z \geq 0, \\ \pi - \arctg |B_y / B_z| & \text{при } B_y / B_z < 0, \\ \pi / 2 & \text{при } B_y / B_z = 0, \end{cases}$$

B_y — складова вектора ММП уздовж осі y , $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $R_{ef} \approx 10R_E$ — характерний розмір поперечного перерізу магнітосфери, $R_E \approx 6400$ км — радіус Землі.

Величини потужності P_{OM} , P_{OM1} і P_{OM2} задавалися виразами

$$P_{OM} = P_{OM1} + P_{OM2}, \quad P_{OM1} = 3.04 \cdot 10^{-2} |B_s| V_{sw},$$

$$P_{OM2} = 1.93 \cdot 10^{-2} p_{sw} v_{sw} + 11.8, \quad (4)$$

де

$$|B_s| = \begin{cases} |B_z| & \text{при } B_z < 0, \\ 0 & \text{при } B_z \geq 0, \end{cases}$$

p_{sw} — тиск частинок сонячного вітру. У виразі (4) B_s — в нТл, V_{sw} — в км/с, p_{sw} — в нПа, P_{OM} , P_{OM1} і P_{OM2} — в ГВт. Величина P_{OM} була введена в роботі [65] і дорівнює потужності, що виділяється в іоносфері за рахунок надходжень енергії ММП при негативних значеннях B_z (P_{OM1}) і кінетичної енергії сонячного вітру (P_{OM2}).

Спочатку проілюструємо енергетику бурі (рис. 4, а). Як видно з рис. 4, а, протягом 3...6 листопада значення ε_A і P_{OM1} не перевищували 100 ГВт, а значення P_{OM2} і P_{OM} — 35 і 130 ГВт відповідно. Початкову і головну фази ГБ супроводжувало підвищення величини ε_A , яка 7 листопада до 14:00 UT зросла до 300 ГВт, а о 22:00 її значення перевищило 2 ТВт. До кінця доби ця величина знову стала меншою за 100 ГВт. На початку 8 листопада у протягом години величина ε_A різко зросла до максимального значення 4.4 ТВт, а потім протягом 9 год зменшилася, і до середини 9 листопада не перевищувала 200 ГВт. У цей день з 18:00 UT до 20:00 UT величина ε_A збільшилася до 4.1 ТВт, а до 04:00 UT 10 листопада зменшилася практично до нуля. Ще один локальний максимум цієї величини мав місце 10 листопада о 08:00 зі значенням 1 ТВт, а протягом решти часу спостережень ε_A зазвичай не перевищувала 100 ГВт.

Величина P_{OM1} 7 листопада мала локальні максимуми 50, 140 і 250 ГВт о 02:00, 14:00 і 20:00 відповідно, після чого до 1:00 UT 8 листопада вона зросла до максимального значення 910 ГВт. За наступні 10 год її значення впало до нуля. Протягом другої половини 8 листопада — середини 9 листопада значення P_{OM1} становило 50...100 ГВт. О 13:00 UT 9 листопада мав місце локальний максимум цієї величини (170 ГВт), а о 19:00 цього ж дня спостерігалось різке зростання P_{OM1} до 550 ГВт, після чого вона прийняла нульове значення. Чергове зростання P_{OM1} розпо-

чалось о 00:00 UT 10 листопада з максимальним значенням 546 ГВт о 05:00 UT. За наступні 7 год її значення зменшилися до 120 ГВт, і зазвичай не перевищували 50 ГВт до кінця спостережень.

Перше істотне збільшення величини P_{OM2} мало місце 7 листопада о 10:00 UT, коли її значення протягом 1 год зросло з 30 до 75 ГВт. Залежність P_{OM2} мала ряд порівняно гострих максимумів протягом 7 листопада 12:00 UT, 18:00 UT та 22:00 UT, які дорівнювали 100 ГВт, 265 ГВт (максимальне значення за період спостережень) і 160 ГВт відповідно. У першій половині 8 листопада P_{OM2} мала локальний максимум 75 ГВт протягом 03:00...04:00 UT, після чого її значення зменшилося, і до 08:00 UT 9 листопада знову не перевищувало 35 ГВт. На 10:00 UT цього дня P_{OM2} зросла до 85 ГВт, а о 19:00 UT спостерігався її локальний максимум 240 ГВт. У період часу 22:00 UT 9 листопада — 00:00 UT 10 листопада значення P_{OM2} становило 190...215 ГВт, а до 6:00 UT 10 листопада вона зменшилася до 55 ГВт. Однак на відміну від ϵ_A і P_{OM1} величина P_{OM2} протягом наступних 60 год зазнавала квазіперіодичних коливань зі зменшуваним приблизно від 14 до 8 год періодом і середньою амплітудою близько 45 ГВт. О 18:00 UT 12 листопада P_{OM2} зменшилася до 20 ГВт і вже не перевищувала 35 ГВт до кінця спостережень.

Поведінка сумарної потужності P_{OM} у період ГБ майже повністю визначалася часовою залежністю P_{OM1} , значення якої зазвичай у 3...4 рази перевищували значення другого доданка P_{OM2} (див. рис. 4, а). Відзначимо, що P_{OM} приймала максимальні значення о 22:00 UT 7 листопада (765 ГВт), 2:00 UT 8 листопада (960 ГВт — абсолютний максимум за час спостережень), а також о 19:00 UT 9 листопада (775 ГВт) і о 04:00 UT 10 листопада (620 ГВт).

Флуктуації геомагнітного поля. Варіації геомагнітного поля досліджувалися за даними магнітометра-флюксометра, розташованого у Магнітометричній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна (49.65° пн. ш., 36.9° сх. д.). Магнітометр-флюксометр вимірює рівень H - і D -складових геомагнітного поля. Перша з них відповідає напрямку північ — південь, друга — схід — захід. Далі проілюструємо інтенсивність магнітної бурі. На рис. 4,

б представлено часові залежності коливань H - і D -складових геомагнітного поля в смузі періодів 1...1000 с, а також їхніх середніх квадратичних відхилень σ_H і σ_D . Як видно, протягом 3...6 листопада амплітуди δH , δD зазвичай не перевищували 5 нТл, а значення σ_H і σ_D — 2 і 3 нТл відповідно. Сплески з амплітудами 17 і 69 нТл (H -складова) і 6 і 42 нТл (D -складова) спостерігалися відповідно о 10:53 UT та 18:28 UT 7 листопада. У цей час значення σ_H збільшилися до 10 і 41 нТл, а σ_D — до 5 і 16 нТл відповідно.

Протягом кінця 7 листопада — першої половини 8 листопада спостерігалися коливання H - і D -складових з максимальними відхиленнями 25 і 40 нТл. Величини σ_H і σ_D в цей період часу варіювали від 1 до 15 нТл і від 2 до 20 нТл відповідно. Наступний сплеск величин δH і δD , а також їхніх середніх квадратичних відхилень спостерігався після імпульсу раптового початку, що мав місце 9 листопада о 09:30 UT з амплітудами δH і δD близько 15 нТл, значеннями $\sigma_H = 9$ нТл і $\sigma_D = 6$ нТл. При цьому відхилення δH і δD зросли до 15 і 20 нТл, а σ_H і σ_D — до 7 і 9 нТл відповідно. Істотне збільшення варіацій горизонтальних складових геомагнітного поля було зареєстровано після імпульсу раптового початку ($\delta H = 80$ нТл, $\delta D = 36$ нТл, $\sigma_H = 60$ нТл, $\sigma_D = 13$ нТл) 9 листопада о 18:50 UT. До кінця 9 листопада максимальні абсолютні значення δH і δD досягали 65 і 100 нТл, σ_H і σ_D — 44 і 37 нТл відповідно, а 10 листопада вони зменшилися до 40 нТл для H - і D -складових і до 18 і 28 нТл відповідно. До кінця цього дня варіації величин, наведених на рис. 4, б, істотно зменшилися, і до кінця часу спостереження не перевищували максимальних значень, що мали місце 3...6 листопада 2004 р.

8.4. Процеси в нижній іоносфері. 8.4.1. *Варіації концентрації електронів.* На рис. 5 і 6 відповідно представлені часові залежності концентрації електронів N на висотах 73...83 км, отримані в дні з невеликим магнітним збуренням (3 і 13 листопада 2004 р.) і під час ГБ (9-10 листопада 2004 р.). Пропуски на часових даних викликані зменшенням відношення сигнал/шум, що не дозволило з прийнятною похибкою відновити значення N . З рис. 5 видно, що в усі дні і на всіх висотах значення N зазнавали суттєвих варіацій

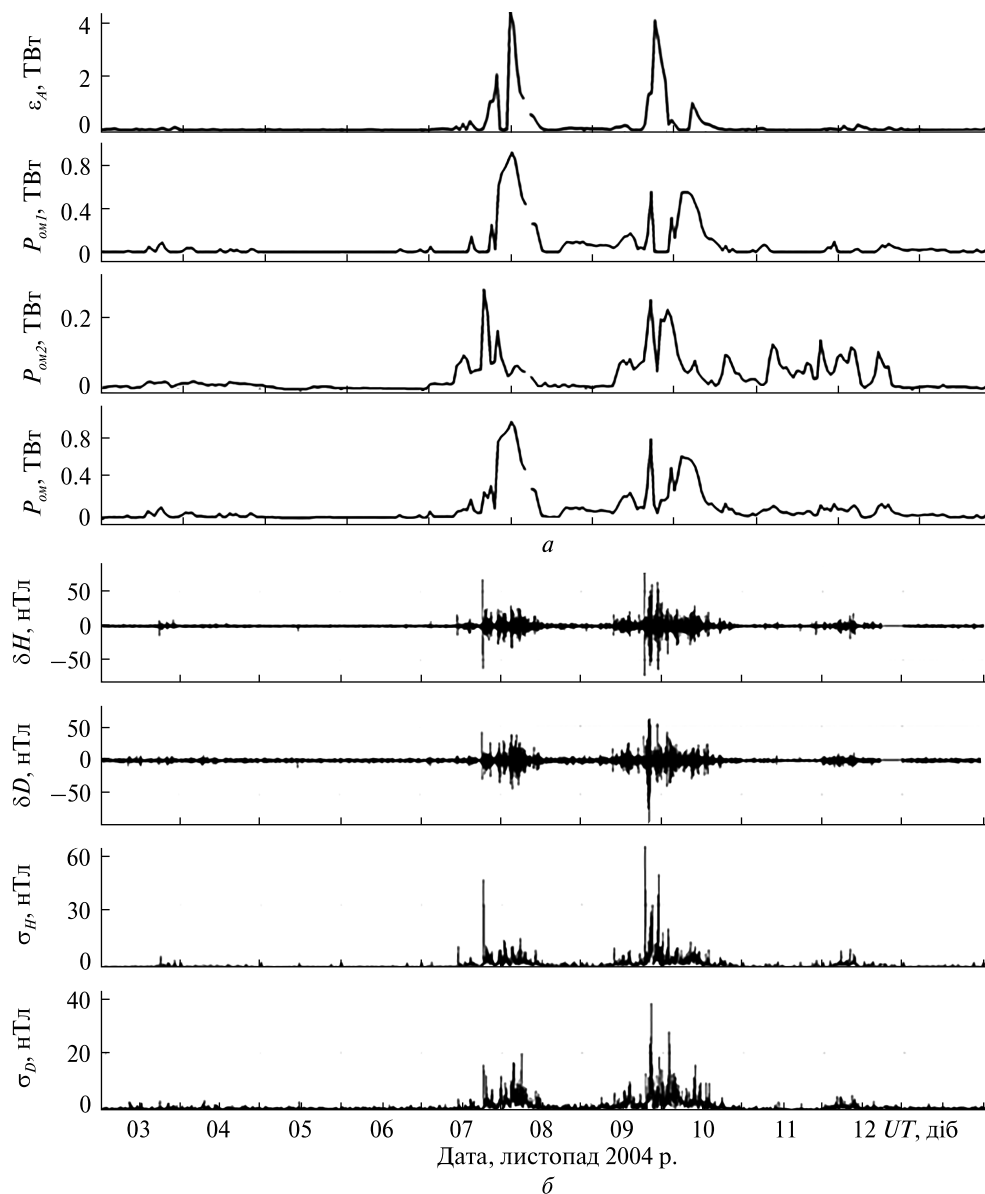


Рис. 4. Часові варіації: *a* — припливу енергії в замкнуту магнітосферу і іоносферу, *б* — параметрів геомагнітного поля 3...13 листопада 2004 р. (ε_A — функція Акасофу, P_{OM1} — потужність, що виділяється в іоносфері при $B_z < 0$, P_{OM2} — потужність, що виділяється в іоносфері за рахунок кінетичної енергії сонячного вітру, $P_{OM} = P_{OM1} + P_{OM2}$, δH і δD — варіації рівня горизонтальних складових геомагнітного поля, σ_H і σ_D — середні квадратичні відхилення флуктуацій рівня горизонтальних складових геомагнітного поля)

з часом. Значення концентрації електронів 3 і 13 листопада на висотах 73.5...76.5 км зазвичай становили $(1...4) \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$. На висоті 82.5 км 3 листопада величина N в середньому дорівнювала $7 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, а в окремі проміжки часу перевищувала 10^9 м^{-3} (див. рис. 5).

У період ГБ в основному відбувалося розширення максимальних значень N і амплітуд її варіацій. Так, 9 листопада значення N в окремі проміжки часу зростала до $1.1 \cdot 10^9$ і $5.5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ на висотах 73.5 і 76.5 км відповідно (див. рис. 6, *a*). Цікава поведінка електронної концентрації

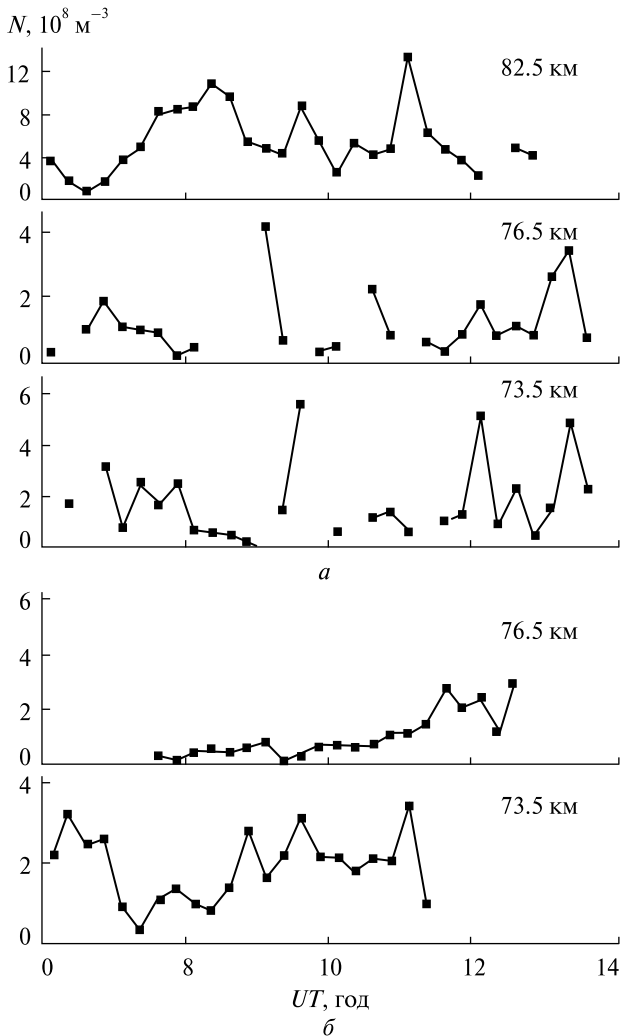


Рис. 5. Варіації концентрації N електронів в нижній іоносфері при невеликих магнітних збуреннях: *a* — 3 листопада 2004 р., *б* — 13 листопада 2004 р.

спостерігалася 10 листопада під час максимальних збурень геомагнітної обстановки. На рис. 6, *б* видно сплески N в нижній іоносфері до $2.1 \times 10^9 \text{ м}^{-3}$ на висотах 73.5 і 79.5 км і до $1.5 \times 10^9 \text{ м}^{-3}$ — на висоті 76.5 км. При цьому момент спостережень максимальних значень збільшувався зі зменшенням висоти і дорівнював 6:35, 9:05 і 10:35 UT для висот 79.5, 76.5 і 73.5 відповідно. Тривалість цих сплесків зазвичай не перевищувала 1-2 год.

8.4.2. *Хвильові збурення (ХЗ).* Хвильові збурення концентрації електронів. У літературі практично

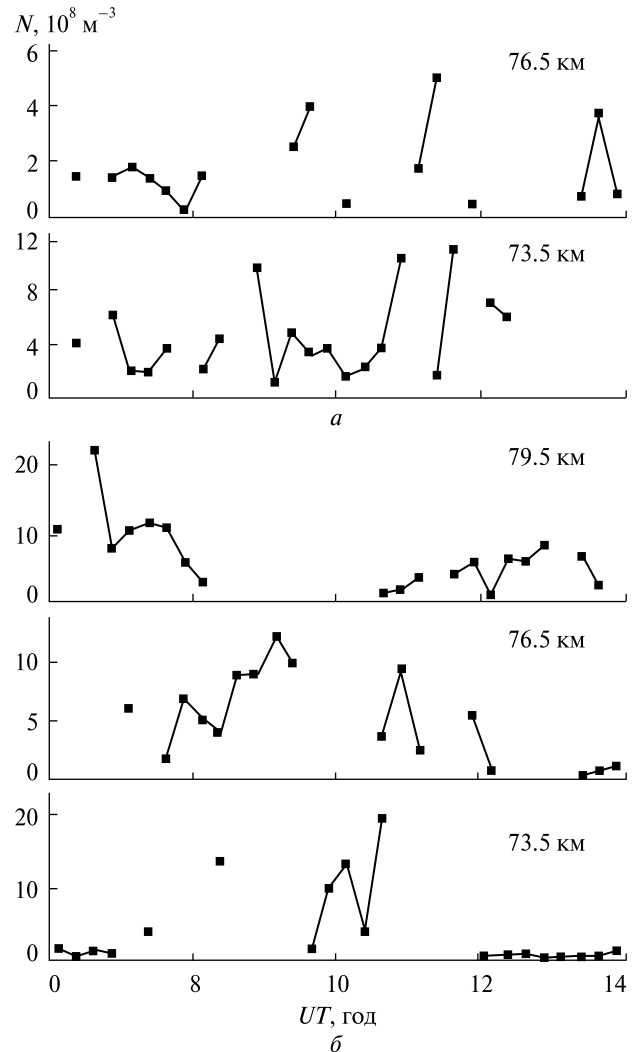


Рис. 6. Варіації концентрації N електронів у нижній іоносфері під час ГБ: *a* — 9 листопада 2004 року, *б* — 10 листопада 2004 р.

немає відомостей про ХЗ у нижній іоносфері під час унікальних ГБ. Фактично єдиним винятком є робота авторів [66]. Дослідження параметрів ХЗ в нижній іоносфері проводилися 3, 8...10 і 12—13 листопада 2004 р. Результати спостереження ХЗ у період ГБ у денний час на кількох висотах (активний метод) і в нічний час (пасивний метод) наведені на рис. 7...10. Відповідно до запропонованого в роботах [67] умовного поділу ХЗ на два типи окремо показано часові залежності відносних амплітуд коливань δ_{Nm} з періодами $T = 2...30$ хв і з $T = 30...180$ хв.

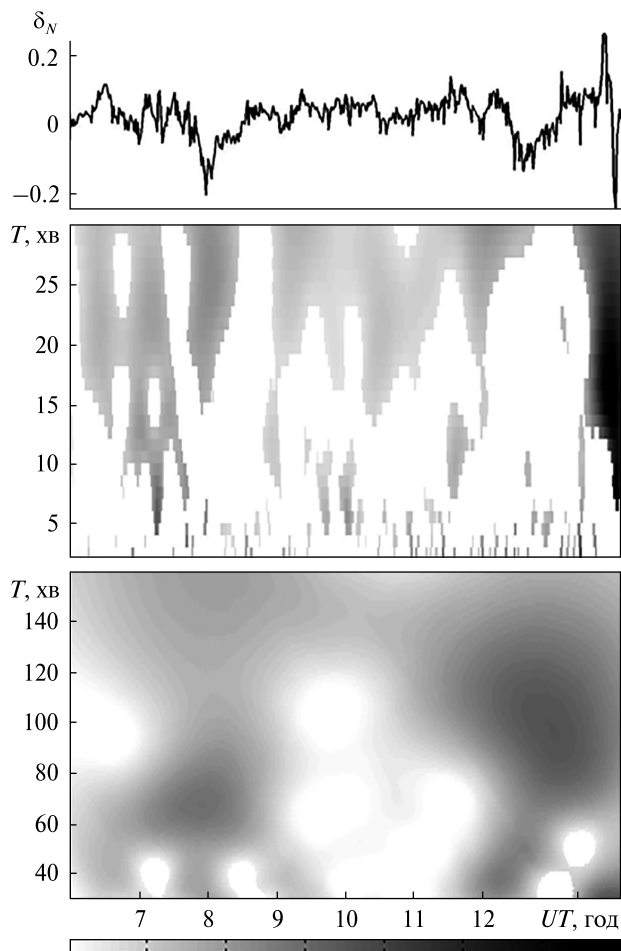


Рис. 7. Відносна амплітуда ХЗ концентрації електронів у період ГБ, отримані активним методом 9 листопада 2004 року на висоті 87 км

Аналіз отриманих результатів виявив досить хорошу подібність як часових залежностей відносних варіацій концентрації електронів δ_N , так і спектрів їхніх амплітуд на висотах, віддалених на 3...6 км (див. рис. 7, 8). Тут і далі $\delta_N = (N - N_0) / N_0$, де N і N_0 — збурені і незбурені значення концентрації електронів. Часові варіації δ_N вдень 9 листопада зазвичай не перевищували 0.2. У цей день спостерігалися ХЗ в широкому діапазоні періодів від 25 до 180 хв, а значення δ_{Nm} зазвичай були меншими за 0.08. Винятком є лише квазіперіодичний процес з періодом близько 15...20 хв і $\delta_{Nm} \approx 0.1$, що спостерігався в кінці денного часу вимірювань. Однак така поведінка δ_N може бути також викликано підвищенням відношення сиг-

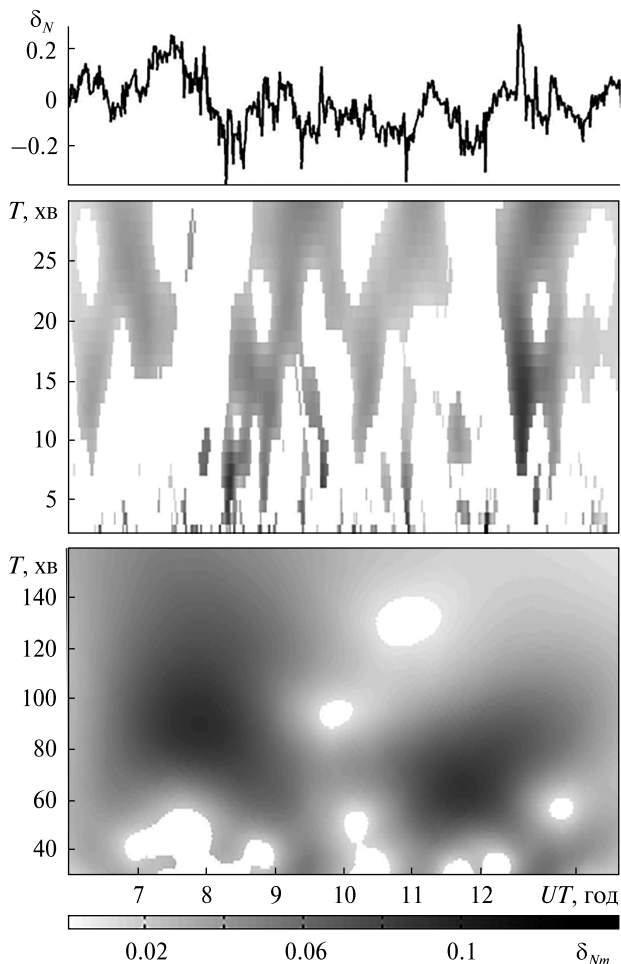


Рис. 8. Те ж, що і на рис. 7, для 10 листопада 2004 року на висоті 87 км

нал/шум або крайовими ефектами при обробці даних.

У денний час протягом 10 листопада поведінка δ_N мала цікаві особливості, які яскравіше виражені на висоті 93 км. Розпочате близько 7:00 UT коливання з $T \approx 80$ хв і $\delta_{Nm} \approx 0.11$ після закінчення часу, що приблизно дорівнює його періоду, змінилося квазіперіодичним процесом з $\delta_{Nm} = 0.07...0.09$ і періодом, який зменшувався від 60 до 30 хв. Цей процес тривав приблизно до 11:00 UT. Описані ХЗ були менш помітні на висоті 87 км, що, ймовірно, пояснюється меншим значенням відношення сигнал/шум. Зате тут краще проглядається інше коливання з $T = 50...70$ хв, $\delta_{Nm} \approx 0.06$, яке розпочалося після

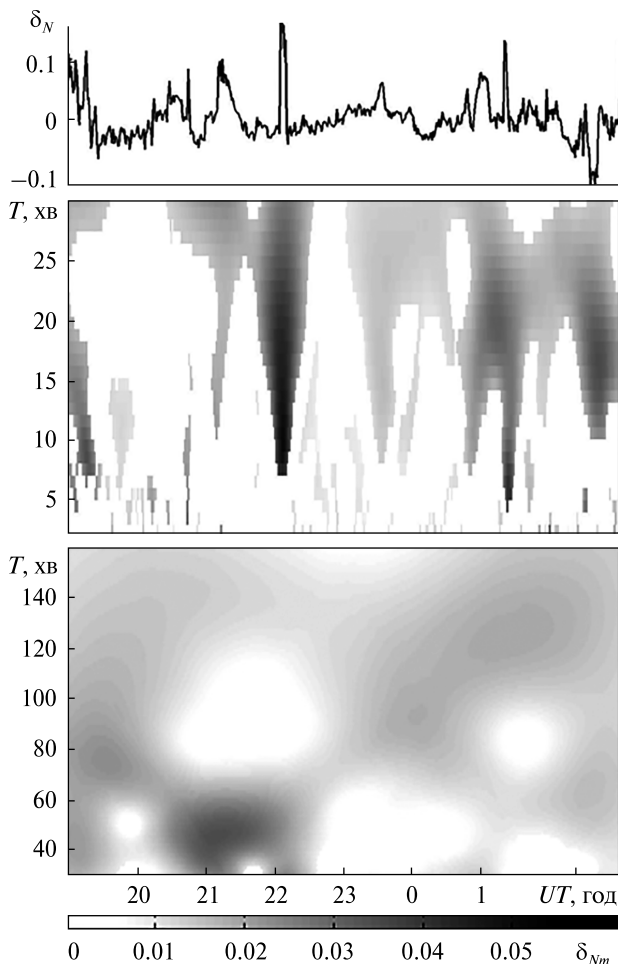


Рис. 9. Параметри ХЗ концентрації електронів у період ГБ, отримані пасивним методом, 8–9 листопада 2004 р.

11:00 UT і тривало приблизно два періоди. Максимальні відхилення значень δ_N 10 листопада становили близько 0.3 і 0.4 на висотах 87 і 93 км відповідно.

У нічний час 8-9 листопада значення δ_N зазвичай змінювалися у межах 0.1. Тут слід зазначити ХЗ з $T = 40...50$ хв і $\delta_{Nm} \approx 0.03$, що спостерігалося з 20:40 UT до 22:00 UT, а також ХЗ з $T = 15...20$ хв, $\delta_{Nm} = 0.03...0.04$, що мали місце близько 1:00 UT і 2:00 UT 9 листопада. Потужний аперіодичний процес, зареєстрований близько 22:00 UT 8 листопада, може не бути пов'язаним з процесами в нижній іоносфері, а викликаний завадою, згенерованою короткочасним увімкненням розташованої близько радіостанції.

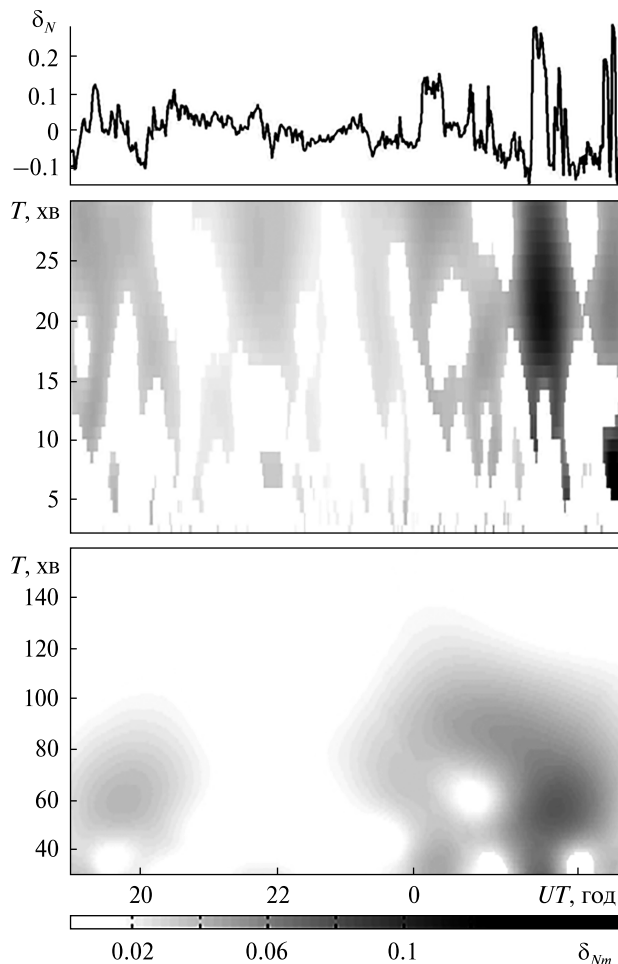


Рис. 10. Те ж, що і на рис. 9, для 9-10 листопада 2004 р.

Вночі 9-10 листопада абсолютні значення δ_N спочатку не перевищували 0.12, а до 1:00 UT зросли до 0.3 (рис. 9, 10). Близько 2:00 UT спостерігалося ХЗ з $T = 18...25$ хв і $\delta_{Nm} = 0.12...0.14$. Відносні амплітуди ХЗ з $T = 30...180$ хв зазвичай не перевищували 0.06.

У періоди невеликих магнітних збурень 12-13 листопада і вдень 3 листопада величина δ_N варіювала у межах 0.2, а значення δ_{Nm} в основному не перевищували 0.1. В окремі проміжки часу 3 листопада переважали ХЗ з періодами 45...60, 70...100 і 120...160 хв, а 13 листопада — з періодами 80...100 хв.

Хвильові збурення горизонтальних складових геомагнітного поля. Дослідження параметрів ХЗ геомагнітного поля з $T = 120...1000$ с проводи-

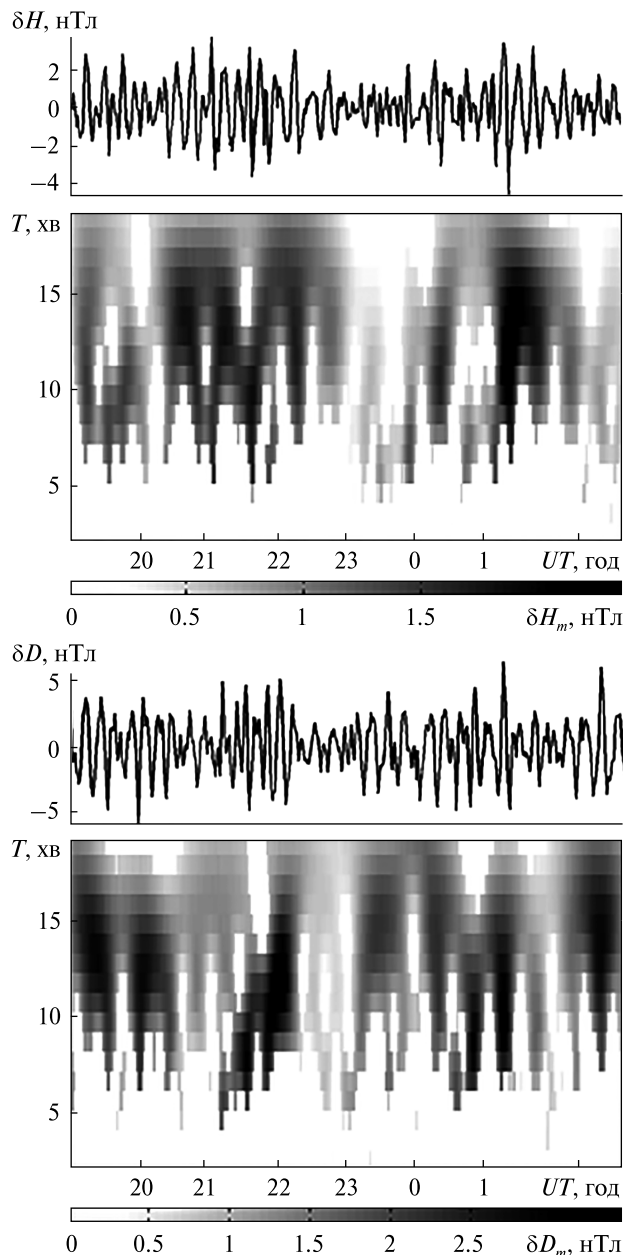


Рис. 11. Параметри пульсацій Pc5-6 (H- і D-складової) у період ГБ для 8-9 листопада 2004 р

лося 8...10 листопада в інтервали часу, що збігаються зі спостереженнями квазіперіодичних процесів в нижній іоносфері активним і пасивним методами. Результати спостережень варіацій H- і D-складових, а також залежно часових змін їхніх амплітуд від періоду представлені на рис. 11–14.

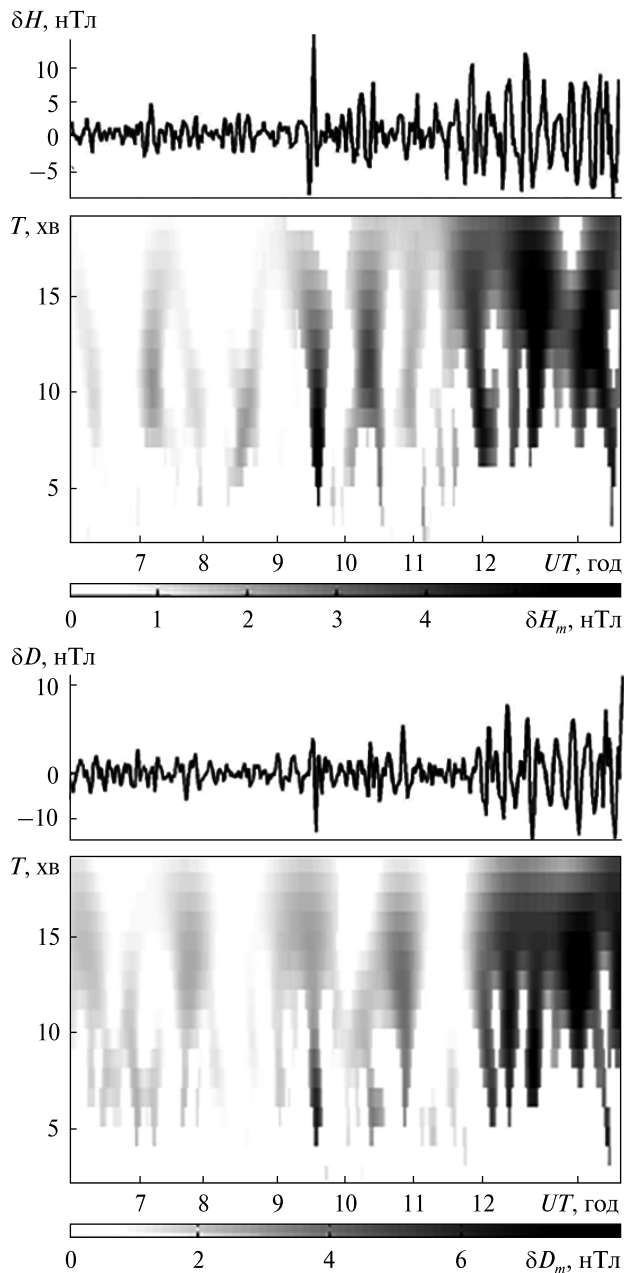


Рис. 12. Те ж, що і на рис. 11, для 09 листопада 2004 р

У нічний час 8-9 листопада 2004 р. ХЗ з $T = 6...20$ хв мали місце протягом практично всього часу спостережень (див. рис. 11). Однак їхня амплітуда була невеликою. Її максимальне значення для H- і D-складових дорівнювало 2.5 і 3.2 нТл відповідно. У денний час 9 листопада, як і зазначалося вище, посилення коливань геомагнітного поля

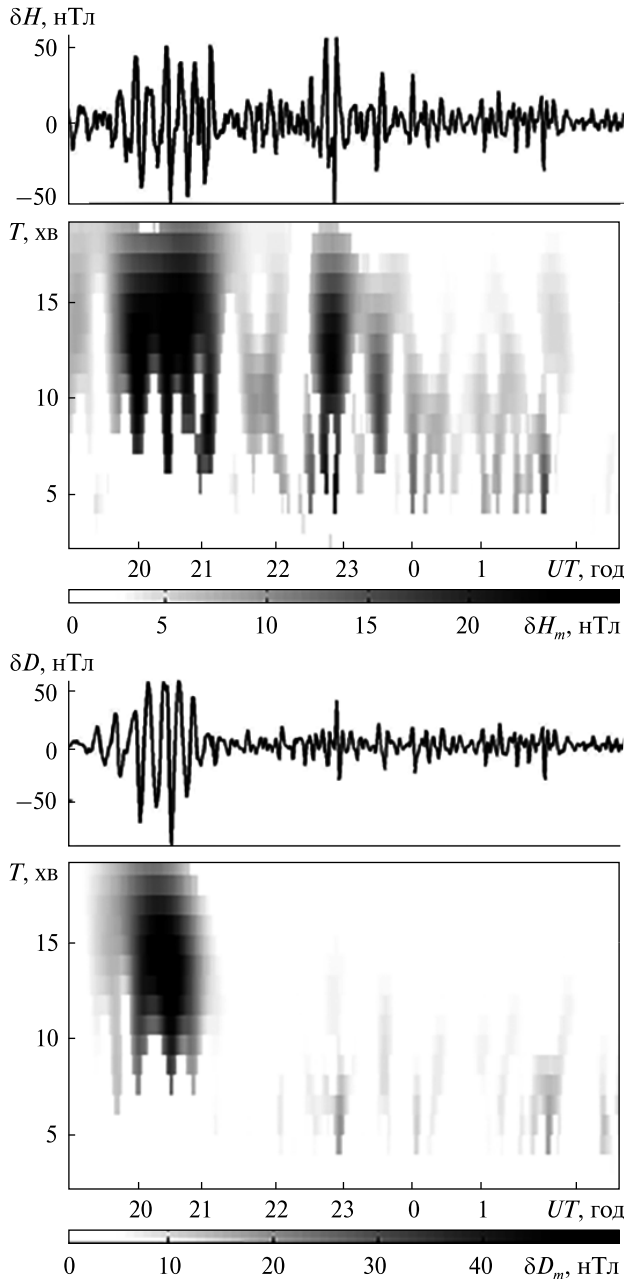


Рис. 13. Те ж, що і на рис. 11, для 09-10 листопада 2004 р.

сталось після імпульсу раптового початку магнітної бурі о 09:30 UT (рис. 12). Через півгодини після імпульсу спостерігалися ХЗ H -складової з $T = 10 \dots 12$ хв і амплітудою $\delta H_m \approx 4$ нТл. Близько 11:00 UT у варіаціях обох горизонтальних складових мало місце нетривале коливання з $T = 10 \dots 15$ хв і значеннями $\delta H_m \approx 2$ нТл, $\delta D_m \approx$

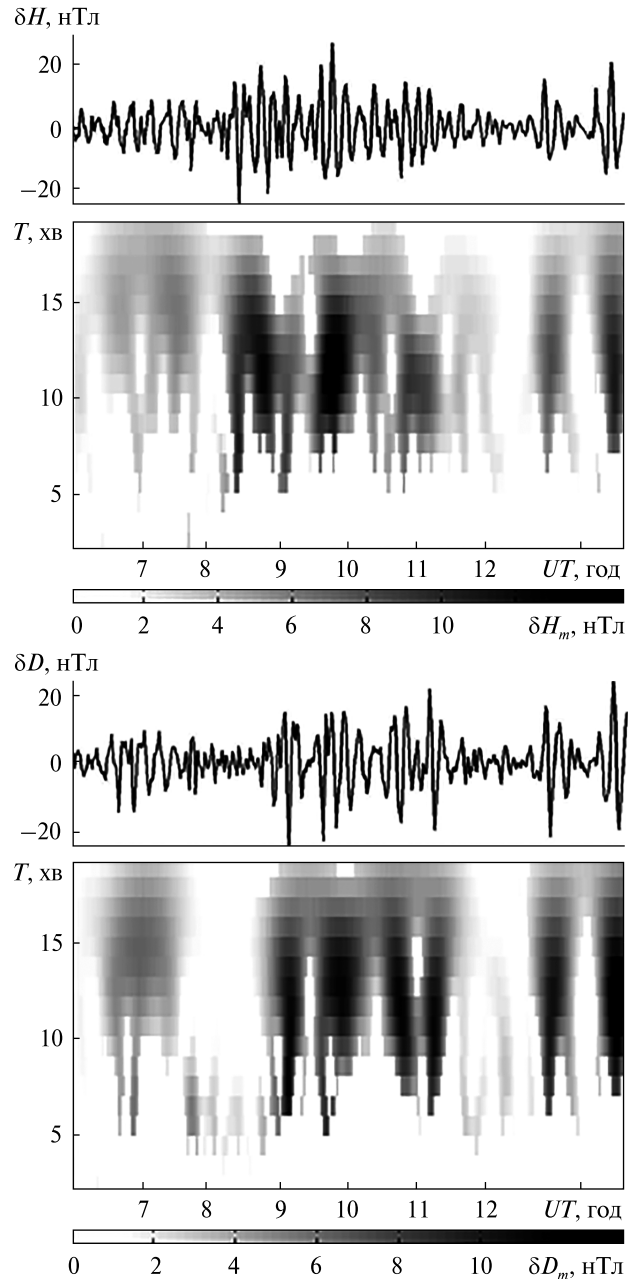


Рис. 14. Те ж, що і на рис. 11, для 10 листопада 2004 р.

≈ 3 нТл. В цей же день, починаючи з 11:30 UT, як для H -, так і для D -складової було зареєстровано ряд ХЗ з $T = 6 \dots 20$ хв і максимальними амплітудами $\delta H_m \approx 7$ нТл, $\delta D_m \approx 9$ нТл, що спостерігалися близько 12:30 UT та 13:30 UT.

Значне збільшення амплітуд коливань геомагнітного поля сталося вночі 9-10 листопада

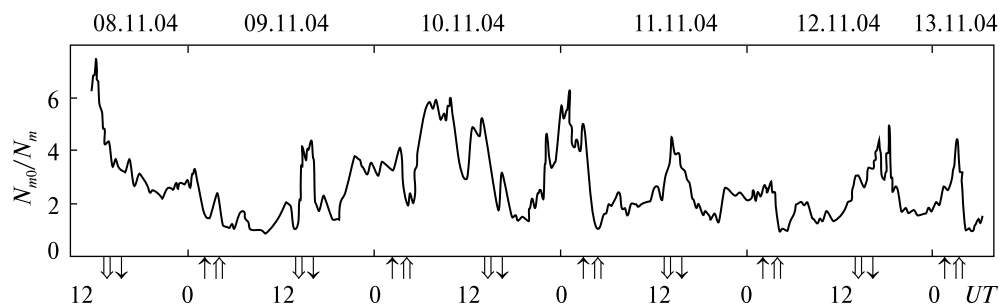


Рис. 15. Часові варіації відношення концентрацій електронів у максимумі шару F2 у магнітоспокійний (контрольний) день 30 жовтня 2004 р. і збурені дні 8...13 листопада 2004 р. N_{m0} — значення концентрації електронів 30 жовтня 2004 р. Тут і далі стрілки позначають моменти сходу (вгору) і заходу (вниз) Сонця на поверхні Землі в Харкові (подвійна) і у магнітоспряженій точці (одинарна)

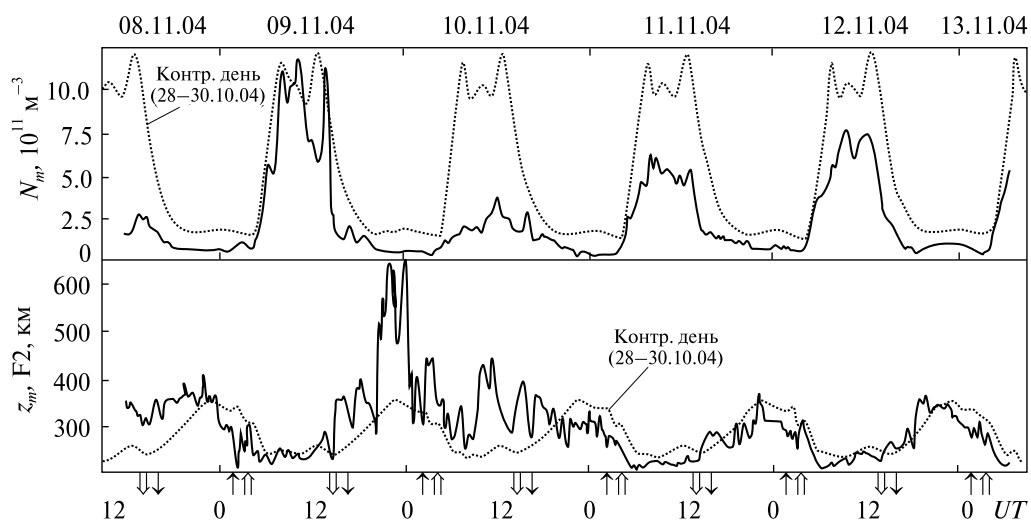


Рис. 16. Часові варіації концентрації електронів N_m F2 у максимумі шару F2 (верхня панель) і висоти максимуму z_m F2 (нижня панель) за даними харківського радара НР в контрольну добу (точка) і збурені дні 8...13 листопада 2004 р. (лінія)

(рис. 13). ХЗ з $T = 8...18$ хв амплітудами $\delta H_m \approx 25$ нТл і $\delta D_m \approx 50$ нТл реєструвалися з 20:00 UT до 21:00 UT. Ще один коливальний процес з $T = 10...15$ хв спостерігався у варіаціях H -складової. Його амплітуда $\delta H_m \approx 30$ нТл, а тривалість — близько 2-3 періодів. Амплітуди інших ХЗ з $T = 5...15$ хв для обох складових зазвичай не перевищували 15 нТл.

Вдень 10 листопада в окремі проміжки часу також мали місце ХЗ. З 6:30 UT до 08:00 UT спостерігалася збурення з $T = 12...16$ хв. Близько 8:30 UT почався наступний квазіперіодичний процес з $T = 8...15$ хв. Він тривав приблизно до 11:30 UT, при цьому значення δH_m і δD_m варію-

вали від 6 до 14 нТл і від 4 до 12 нТл. Ще два ХЗ з $T = 8...15$ хв, амплітудами близько 7 і 10 нТл (H -складова) і близько 10 і 12 нТл (D -складова), тривалістю близько двох періодів були зареєстровані приблизно о 13:00 UT та 13:40 UT відповідно (рис. 14). Протягом 3 і 12-13 листопада величини δH , δD зазвичай не перевищували 3 нТл, а значення σ_H і σ_D — 1 і 2 нТл відповідно. В цілому в різні проміжки часу мала місце як часткова (див. рис. 12, 13), так і практично повна (див. рис. 11, 14) подібність часових варіацій горизонтальних складових геомагнітного поля.

8.5. Процеси в середній і зовнішній іоносфері. Магнітні бурі супроводжувалися негативним

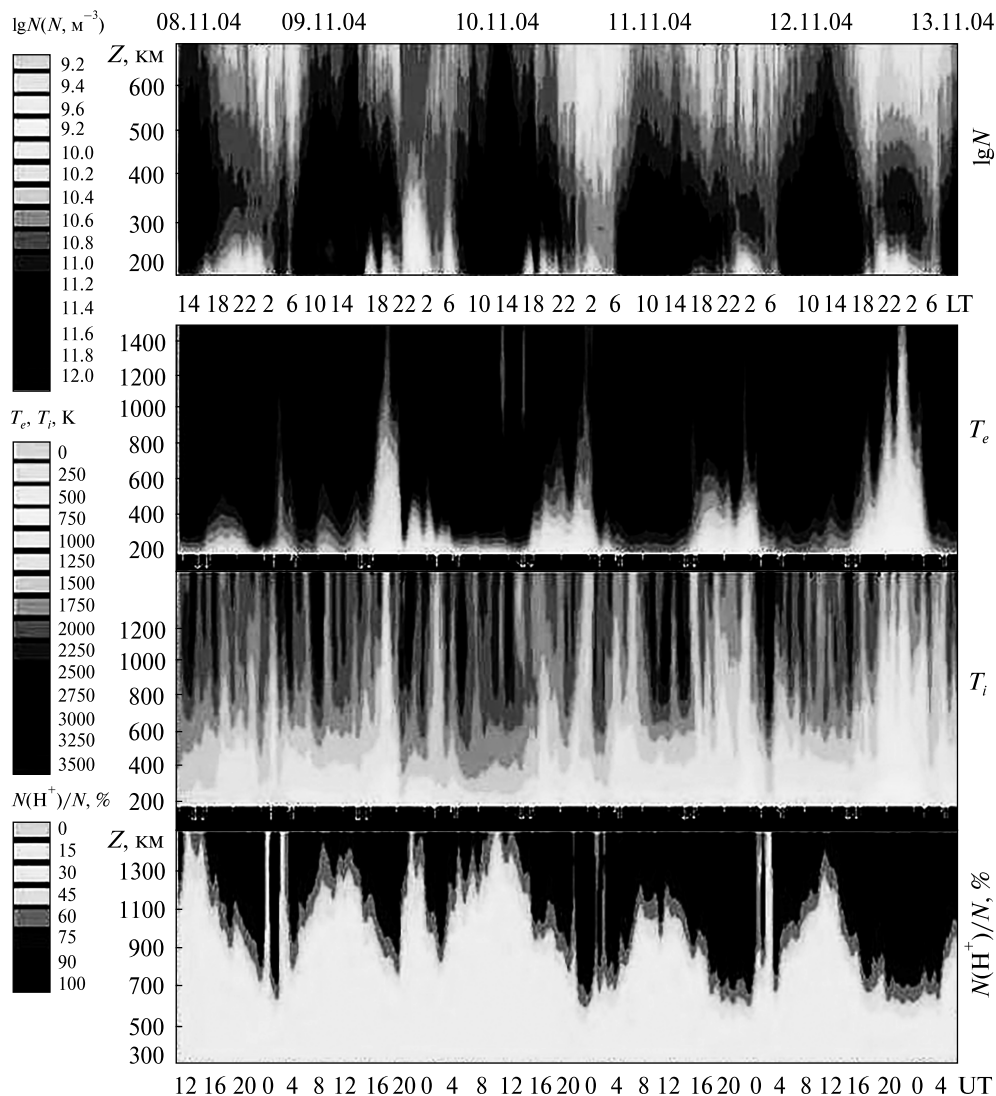


Рис. 17. Часові варіації параметрів іоносфери: концентрації електронів $\lg N$ (без згладжування), T_e , T_i , $N(H^+)/N$ (ковзні усереднення на інтервалі 75 хв з кроком 15 хв) 8...13 листопада 2004 р.

іоносферним збуренням, яке спостерігалось від початку і до кінця вимірювань. Відхилення $\delta f_o F2$ критичної частоти шару F2 від значень в спокійний день досягло -60% у полуденний час 8 і 10 листопада, коли геомагнітна активність була найбільш високою. За контрольні дані взято усереднені значення $f_o F2$ за 28...30 жовтня 2004 р. ($A_p = 3, 3, 17$). Для радара НР в Харкові ($\lambda = 36.3^\circ$ E) місцевий час відповідає $LT \approx (UT + 2:25)$. У ранкові години 9 листопада $\delta f_o F2$ зменшилося і наблизилося до нуля поблизу полудня. У наступну добу 11 і 12 листопада денні значен-

ня $\delta f_o F2$ залишалися негативними на рівні -30 і -20% , а вночі 8...12 листопада вони становили $-40, -45, -60, -40, -20\%$ відповідно.

Прояви негативних іоносферних збурень добре видно з рис. 15. З нього видно, що під час ІБ значення N зменшувалися до 6-7 разів.

8.5.1. *Варіації концентрації електронів.* Часові варіації концентрації електронів $N_m F2$ у максимумі шару F2 наведено на рис. 16. У спокійну добу (28...30 жовтня) їхньою особливістю була наявність двох максимумів, які свідчили про неповний перехід до зимового сезону. Натомість

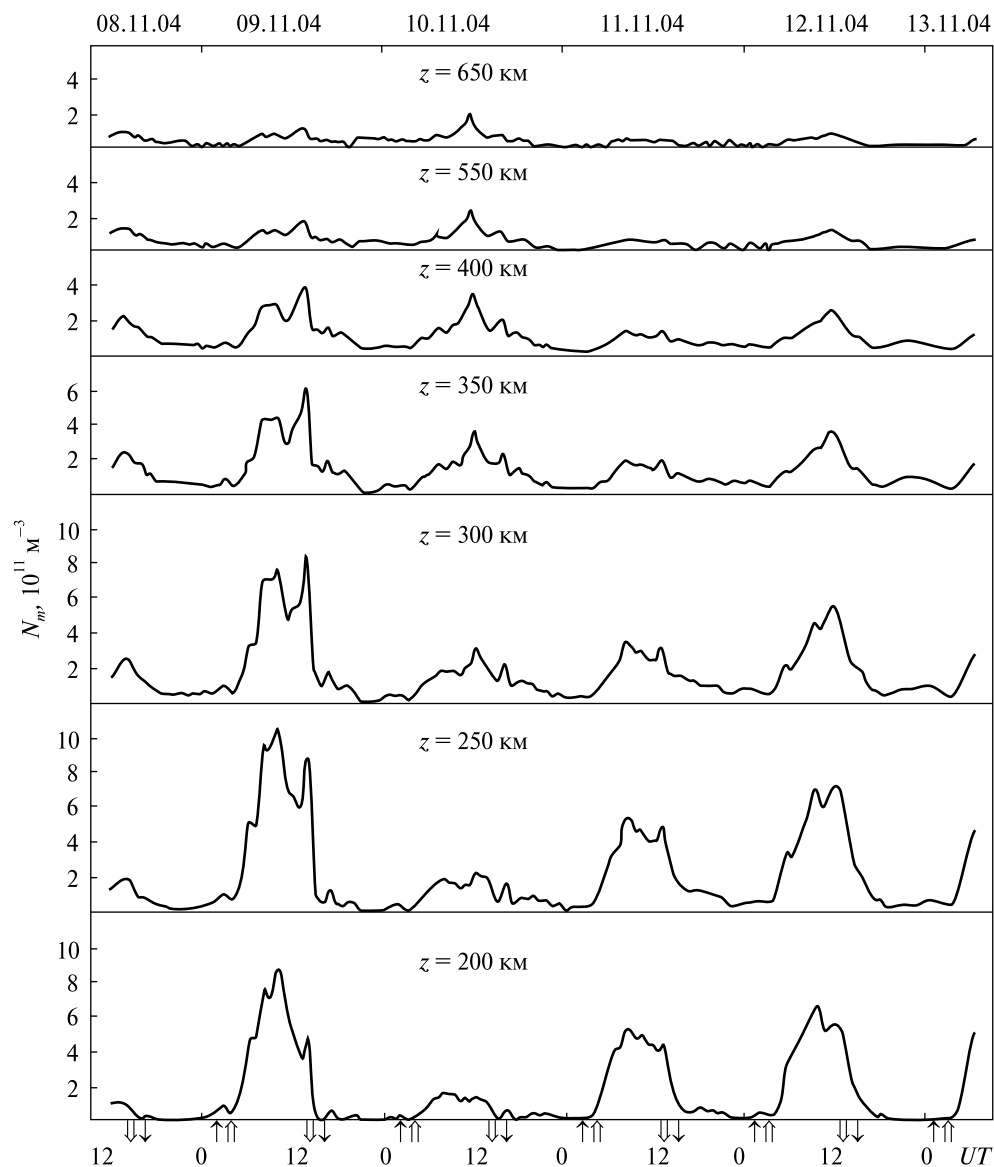


Рис. 18. Часові варіації концентрації електронів N на фіксованих висотах 8...13 листопада 2004 року (ковзне усереднення на інтервалі 45 хв з кроком 15 хв)

амплітуда добових варіацій $N_m F2$ перевищувала шість разів, і більшою мірою відповідала особливостям зимової іоносфери. Видно, що вечірній максимум $N_m F2$ можна порівняти з денним, що характерно для спаду СА.

Інтенсивність іоносферної бурі сильно змінювалася (див. рис. 15 і 16). Найбільше зменшення $N_m F2$ у порівнянні з контрольним днем становило сім разів поблизу полудня 8 листопада, відразу після головної фази першої бурі при $K_p =$

$= 7.0$, шість разів — у денні години 10 листопада на тлі головної фази другої бурі при $K_p = 8.3...8.7$. Зменшення $N_m F2$ до 6 разів відзначалося також у ніч 10-11 листопада під час фази відновлення другої бурі при значеннях $K_p = 5.3...4.0$.

Рис. 17 ілюструє поведінку основних параметрів іоносфери під час бурі в діапазоні висот 200...1500 км. Видно, що 11 листопада буря почала стихати, поступове відновлення $N_m F2$ тривало до кінця вимірювань. На рис. 18 наведено

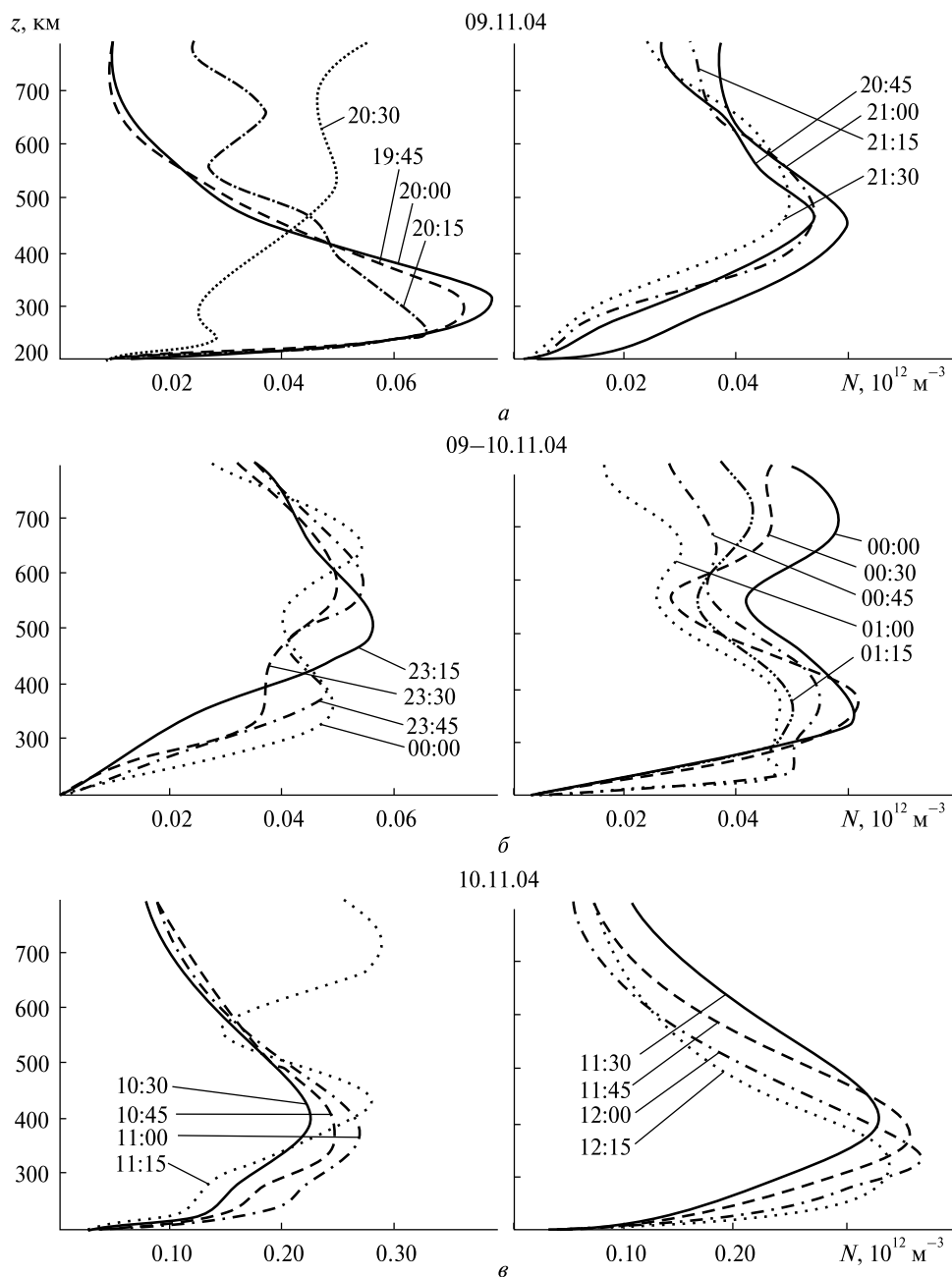


Рис. 19. Приклади висотних профілів N , отриманих методом некогерентного розсіяння з 15-хв накопиченням сигналу, у послідовні моменти часу UT протягом головної фази другої магнітної бурі ($K_p = 8.3$). В інтервалі 00:00–1:15 UT та о 11:15 UT спостерігався характерний денний високоширотний профіль з двома максимумами

варіації N на висотах 200...650 км. Видно, що з ростом висоти внесок процесу дифузії у вертикальний розподіл N протягом бурі змінювався.

Варіації висоти максимуму шару F2 в розглянуті дні наведено на рис. 16. У спокійну добу

$N_m F2$ змінювалася приблизно від 230 км вдень до 350 км вночі. Під час бурі спостерігався підйом шару F2, який становив близько 80 км вдень 8 листопада, майже 300 км в ніч 9–10 листопада і 150...180 км опівдні 10 листопада.

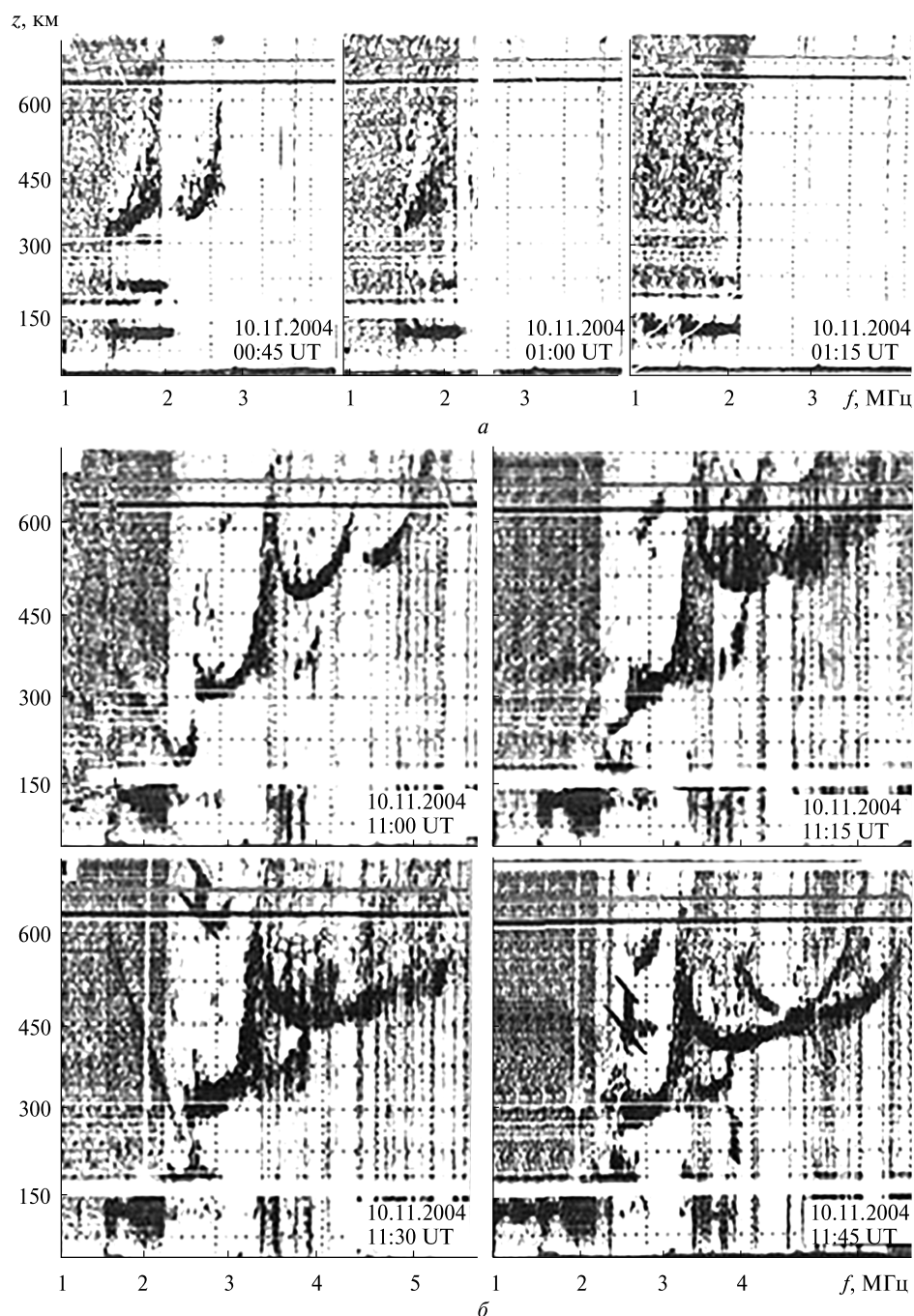


Рис. 20. Приклади іонограм, характерних для високих широт, протягом головної фази другої магнітної бурі: *a* — в нічний час (00:45...01:15 UT), *б* — в денний час (11:00...11:45 UT) спостерігалися характерні нічні високоширотні іонограми

Висотні розподіли концентрації електронів в області $F2$ іоносфери. На рис. 19 наведені приклади висотних профілів N у послідовні моменти часу (через 15 хв) протягом головної фази другої бурі,

а саме в ніч 9-10 листопада і вдень 10 листопада ($K_p \approx 8$). Видно, що протягом тривалого часу спостерігалася деформація профілів $N(z)$. Їхнє зіставлення з даними іонозонда показало, що при

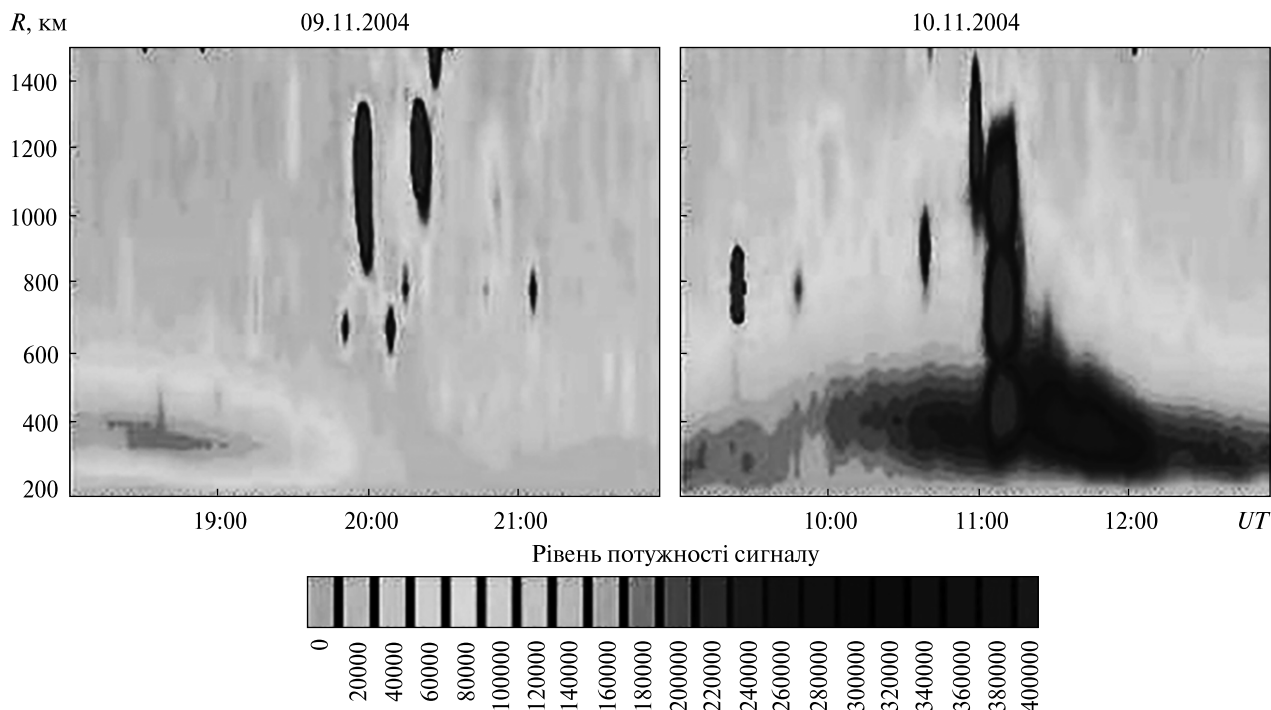


Рис. 21. Приклади когерентних відлунь під час ГБ 9-10 листопада 2004 р. Дані усереднено по висоті (дальності) з наростаючим кроком приблизно від 30 км на висоті 240 км і до 160 км на висоті 1350 км. Усереднення за часом — ковзне на інтервалі 3 хв з кроком 1 хв

сильних деформаціях профілів $N(z)$ на іонозонді були зареєстровані іонограми, характерні для високоширотної іоносфери (див. рис. 20). Це проявилось, зокрема, у збільшенні дифузності відбитого сигналу.

8.5.2. Ефект когерентної луни. Рідкісним для середніх широт ефектом стали зареєстровані у період головної фази другої бурі когерентні відбиття (радіоаврора), приклади яких наведено на рис. 21. Сигнали спостерігалися 9 листопада приблизно з 16:12 UT до 21:30 UT і 10 листопада близько 02:30 UT, а також з 9:15 UT до 11:15 UT в інтервалі відстаней $R = 650...1500$ км. Потужність луна-сигналів змінювалася в широких межах, часом вона на два порядки перевищувала потужність сигналу НР-радару. Іноді на профілі $N(z)$ спостерігалися два луна-сигнали, наприклад на дальностях $R \approx 750$ і 1400 км. Поблизу полудня 10 листопада, з 11:02 UT до 11:14 UT, були зареєстровані незвичайні профілі $N(z)$ (отримані з накопиченням 1 хв) з двома додатковими максимумами (відбиттями) на висотах

близько 700 км (див. рис. 20) і 1100 км (рис. 21), порівнянними з основним максимумом. Відлуння виникли раптово, тривали близько 15 хв і так само раптово зникли.

8.5.3. Варіації температури електронів та іонів. Варіації температури електронів T_e і іонів T_i у контрольну добу 29 жовтня 2004 р. і під час ГБ 8...13 листопада 2004 р. показано на рис. 17 і 22. Видно, що в спокійних умовах на висотах 250...750 км значення T_e змінювалися приблизно від 700...1400 К вночі до 1400...2500 К близько полудня, а T_i — відповідно від 700...1100 К до 1000...1800 К. Під час ГБ 8 і 10 листопада поблизу місцевого полудня при низьких значеннях $N_m F2 \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ температура T_e збільшилася приблизно до 1800...3200 К за рахунок зменшення швидкості охолодження електронного газу в кулонівських зіткненнях з іонами, яка пропорційна N^2 .

Незвичайне нічне нагрівання плазми на тлі низьких значень N , коли температура T_e досягла денних значень 1600...3000 К на висотах

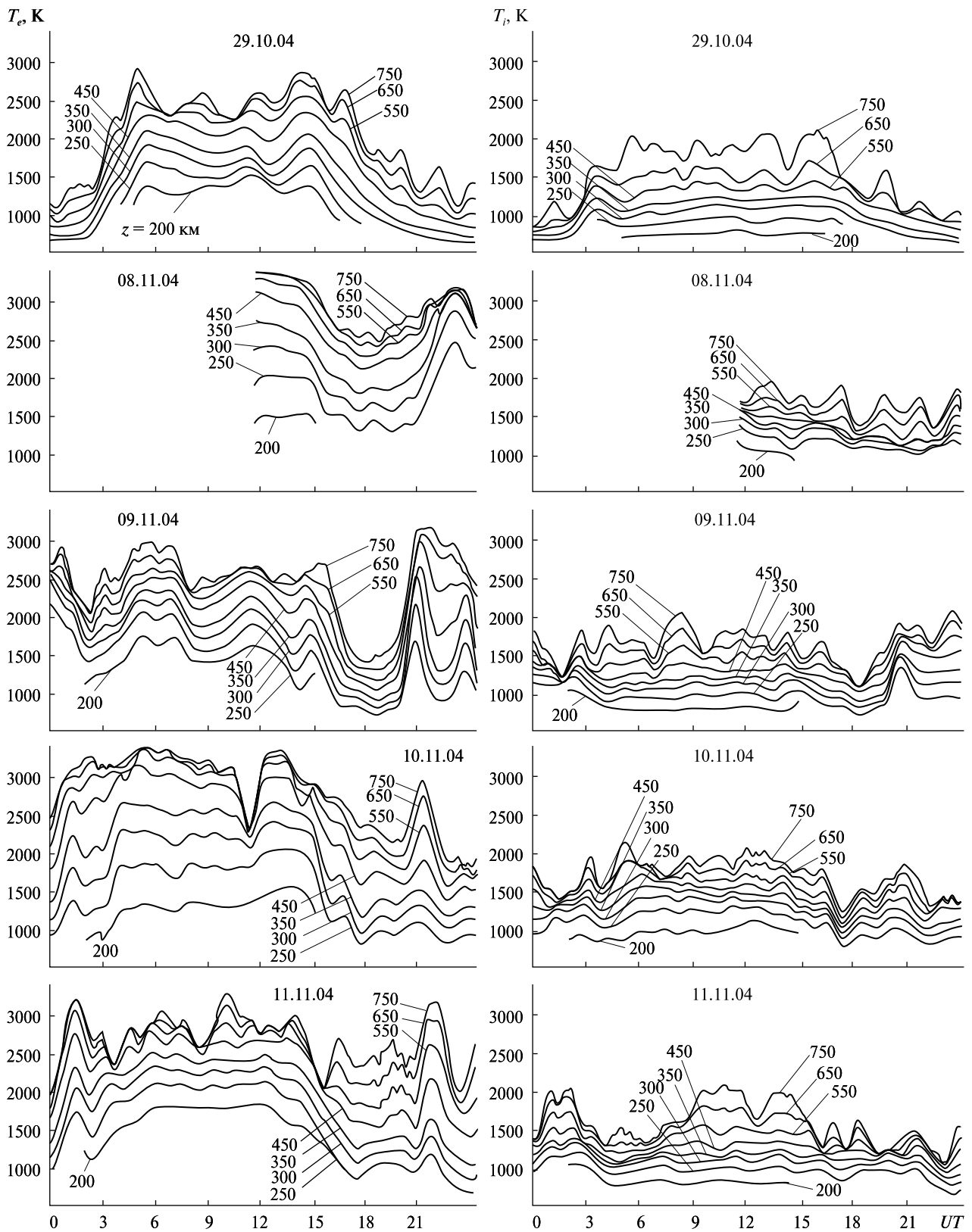


Рис. 22. Поведінка температур електронів T_e (зліва) і іонів T_i (праворуч) у магнітоспокійну добу 29 жовтня і збурені дні 8...13 листопада 2004 р. (ковзне усереднення на інтервалі 75 хв з кроком 15 хв)

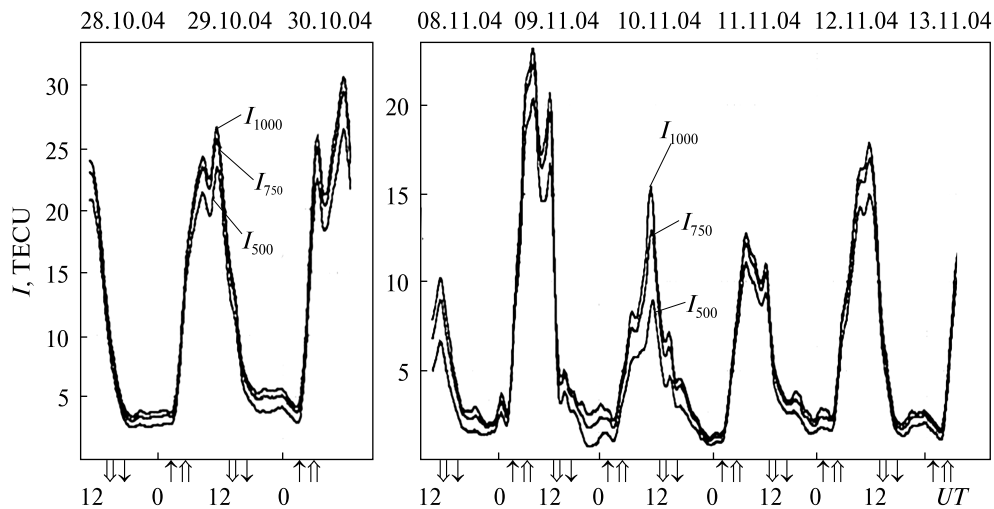


Рис. 23. Часові варіації I ПЕВ до висот 500, 750 і 1000 км у спокійну добу 28...30 жовтня (зліва) та у збурений період 8-13 листопада 2004 р. (справа, ковзне усереднення на інтервалі 105 хв з кроком 15 хв)

250...750 км, відзначалось вночі 8-9, 9-10, 10-11 та 11-12 листопада. Характер нічного нагрівання електронів і його тривалість протягом ночі змінювалися. Температури T_i в нічний час також збільшилися до денних значень близько 1300...2000 К. Це відбувалося вночі 8-9, 9-10, 10-11, а також у передвранішній період 12 листопада. Незвичайне нічне нагрівання плазми в основному супроводжувалось глибокою депресією концентрації електронів на висотах області F2 (див. рис. 17 і 22), що могло свідчити про загальну природу цих збурень.

8.5.4. *Варіації повного електронного вмісту.* Рис. 23 ілюструє варіації повного електронного вмісту (ПЕВ) I у спокійну добу 28...30 жовтня 2004 року і під час ІБ. Значення ПЕВ розраховувалися в інтервалі висот від 100 до 500, 750 і 1000 км. В роботі використовується загальноприйнята в літературі одиниця ПЕВ: 1 TECU = 10^{16} м^{-2} . У спокійних умовах значення ПЕВ плавно наростали з настанням місцевого сходу Сонця, досягнувши максимальних значень поблизу полудня $I \approx 24$ TECU (до висоти 1000 км). Далі величина ПЕВ плавно зменшувалася до нічних значень. Мінімум $I \approx 3.5$ TECU спостерігався перед сходом Сонця. Значні добові варіації I (близько семи разів) характерні для зимових умов. У збурений період на тлі депресії $N_m F2$ зареєстровано зменшення I , яке поблизу місцево-

го полудня становило 2, 2, 1.7 і 1.2 раза 8, 10, 11 і 12 листопада відповідно у порівнянні з даними 29 жовтня, а поблизу півночі — приблизно 2.5 раза в усі ночі. 9 листопада, під час фази відновлення першої МБ, денне значення I перевищило значення в контрольний день.

Як і слід було очікувати, часові варіації $N_m F2$, а також I_{500} , I_{750} , I_{1000} були практично синхронними.

8.5.5. *Варіації іонного складу.* Поведінка відносної концентрації іонів водню $N(\text{H}^+)/N$ на фіксованих висотах для спокійних і збурених умов показані на рис. 24 (верхні панелі). Видно, що в спокійні дні поведінка $N(\text{H}^+)/N$ була типовою для зимового сезону середньої СА. Величина $N(\text{H}^+)/N$ наростала після заходу Сонця, досягла максимального значення поблизу місцевої півночі, і при сході Сонця почала зменшуватися. Наприклад, на висоті 1100 км максимальне нічне значення $N(\text{H}^+)/N \approx 0.9$.

У збурену добу поведінка відношення $N(\text{H}^+)/N$ мала складний характер (див. рис. 17 і 24). Відомо, що воно відображає особливості варіацій таких параметрів верхньої атмосфери, як концентрація іонів O^+ , атомів водню H , температура нейтралів, а також потік іонів H^+ на верхній межі даної області і критичний потік H^+ . Крім того, спостерігалися зменшення («провали») значень $N(\text{H}^+)/N$ вночі 9, 10, 11 і

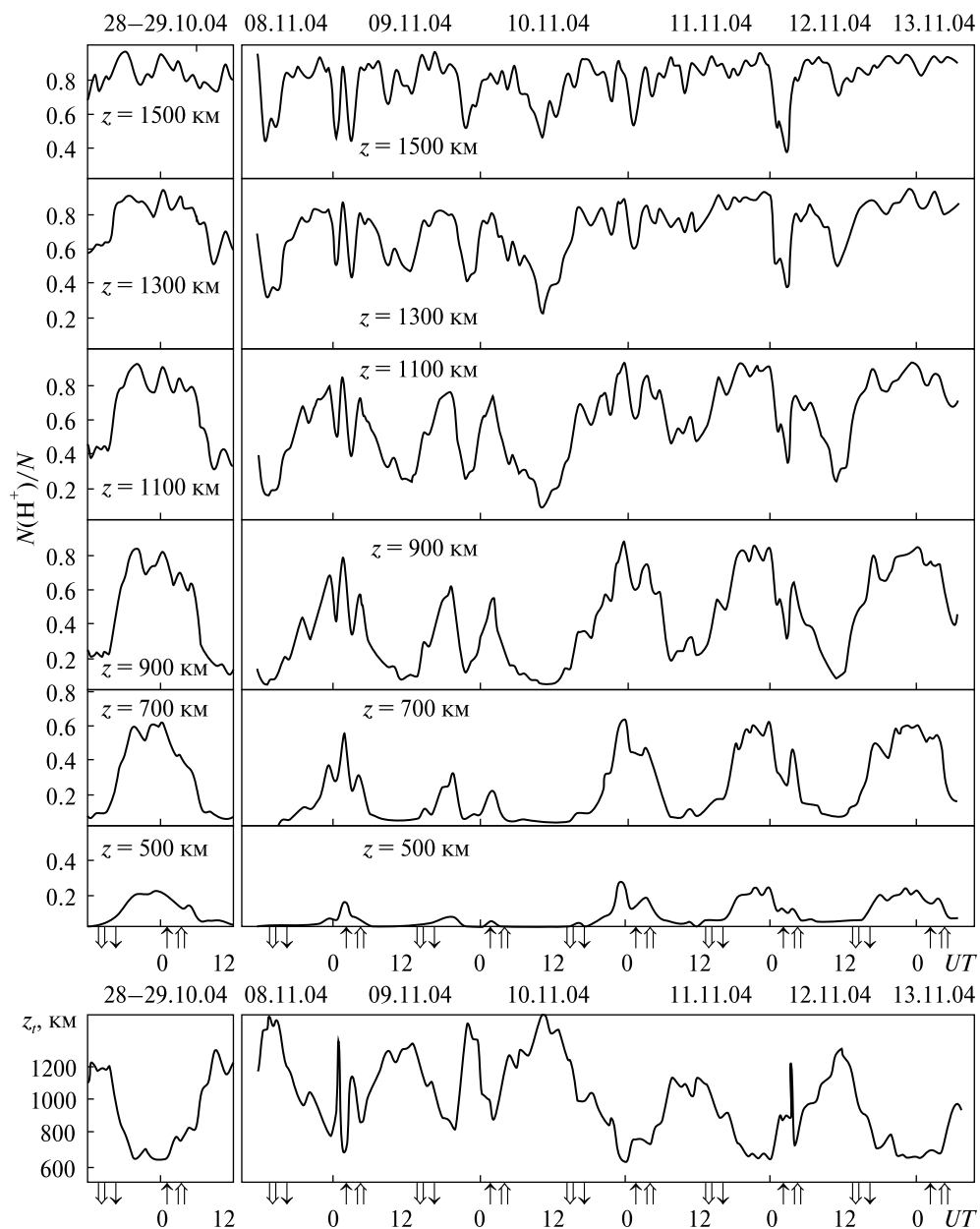


Рис. 24. Часові варіації відносної концентрації іонів водню $N(\text{H}^+)/N$ на фіксованих висотах, де $N(\text{O}^+) = N(\text{H}^+)$, і висоті z_t (нижня панель) в контрольну добу 28-29 жовтня і в збурений період 8...13 листопада 2004 р. (зовні усереднення на інтервалі 105 хв з кроком 15 хв)

12 листопада, які становили 1.5...3.5 рази на висоті 1100 км. Вони мали різну тривалість у часі. З рис. 16, 22 і 24 видно, що збурення іонного складу спостерігалися майже одночасно зі збуреннями концентрації електронів і температури плазми.

На рис. 24 (нижня панель) наведені часові варіації висоти z_t переходу від іонів O^+ до іонів H^+ , де $N(\text{O}^+) = N(\text{H}^+)$. У спокійних умовах z_t змінювалася плавно, досягаючи вдень 1200...1300 км, а вночі — близько 650 км. При високій геомагнітній активності 8 і 10 листопада ($K_p \approx 8.7$)

вдень z_f збільшилася до 1500 км, тобто приблизно на 200 км. У слабкозбурену добу 9 і 12 листопада вона наблизилася до значення у спокійний день (1300 км), а 11 листопада була на 100...200 км меншою. На плавні варіації висоти z_f накладалися її швидкі збільшення, які мали різну тривалість і значення і відповідали описаним вище «провалам» значень $N(H^+)/N$ (див. рис. 24).

8.5.6. *Хвильові збурення* N у верхній іоносфері описано в роботі [17].

Методи аналізу. Статистичному аналізу піддавалися часові залежності потужності комбінації сигналу і шуму P_{sn} , потужності сигналу P_s і потужності шуму P_n . При цьому використовувалися методики, описані в роботах [13, 14, 16, 18].

Аналіз проведено для часових залежностей

$$\delta_q = k\delta P_s / \bar{P}_n \text{ і } \delta_N = \delta P_s / \bar{P}_s,$$

де

$$k = \frac{P_{\max} \tau_{p \max} \Delta f}{P \tau_p \Delta f_{\max} T_{\text{сист}}}$$

(параметри з індексом «max» позначають максимальні значення з усіх вимірювальних кампаній, без індексу — поточні значення для кожної окремої вимірювальної кампанії), P — імпульсна потужність радіопередавального пристрою, $P_{\max} = 2.2$ МВт, $\tau_{p \max} = 800$ мкс, Δf — смуга пропускання фільтра радіоприймального пристрою, $\Delta f_{\max} = 9.5$ кГц, $T_{\text{сист}}$ — ефективна шумова температура системи, приведена до входу радіоприй-

Таблиця 5. Концентрація електронів N , абсолютна ΔN_m і відносна δ_{Nm} амплітуди ХЗ для денного часу (в дужках — для нічного)

Висота, км	Параметр	Дата, листопад 2004 р.				
		8	9	10	11	12
125	$N, 10^{10} \text{ м}^{-3}$	16 (0.4)	31 (2)	18 (2)	28 (1.4)	28 (1.4)
	$\Delta N_m, 10^9 \text{ м}^{-3}$	5 (0.4...1.2)	10...20 (4...6)	7...14 (4...6)	11...22 (2.8...4.2)	11...22 (2.8...4.2)
	δ_{Nm}	0.03 (0.1...0.3)	0.04...0.08 (0.2...0.3)	0.04...0.08 (0.2...0.3)	0.04...0.08 (0.2...0.3)	0.04...0.08 (0.2...0.3)
198	$N, 10^{10} \text{ м}^{-3}$	30 (1.5)	100 (5)	25 (4)	50 (2)	75 (1.4)
	$\Delta N_m, 10^9 \text{ м}^{-3}$	10...17 (2.3...4)	70...150 (5...15)	25...50 (8...12)	34...51 (2...4)	38...90 (1.4...2.8)
	δ_{Nm}	0.03...0.05 (0.15...0.25)	0.07...0.15 (0.1...0.3)	0.05...0.10 (0.2...0.3)	0.05...0.10 (0.1...0.2)	0.05...0.10 (0.1...0.2)
272	$N, 10^{10} \text{ м}^{-3}$	22 (2.2)	90 (4.5)	26 (4.3)	45 (7.5)	60 (7)
	$\Delta N_m, 10^9 \text{ м}^{-3}$	10...20 (2.2...4.4)	60...150 (4.5...9)	10...20 (4.3...6.4)	17...34 (7.5)	30...60 (7)
	δ_{Nm}	0.05...0.10 (0.1...0.2)	0.05...0.10 (0.1...0.2)	0.05...0.10 (0.10...0.15)	0.05...0.10 0.1	0.05...0.10 0.1
400	$N, 10^{10} \text{ м}^{-3}$	20 (2)	35 (1...2)	33 (0.5...1.0)	10 (1...2)	24 (2)
	$\Delta N_m, 10^9 \text{ м}^{-3}$	10 (4...6)	17...35 (1...4)	17...33 (0.5...2)	4...6 (1...2)	10...15 (2)
	δ_{Nm}	0.05 (0.2...0.3)	0.05...0.10 (0.1...0.2)	0.05...0.10 (0.1...0.2)	0.04...0.06 0.1	0.04...0.06 0.1
510	$N, 10^{10} \text{ м}^{-3}$	8 (3)	15 (3)	25 (0.5)	4 (2)	6 (3.7)
	$\Delta N_m, 10^9 \text{ м}^{-3}$	5...7 (4.5...7.5)	7...15 (3...6)	12...25 (0.5...1.0)	2...4 (2...4)	3...6 (3.7...5.5)
	δ_{Nm}	0.05...0.07 (0.15...0.25)	0.05...0.10 (0.1...0.2)	0.05...0.10 (0.1...0.2)	0.05...0.07 (0.1...0.2)	0.05...0.07 (0.10...0.15)

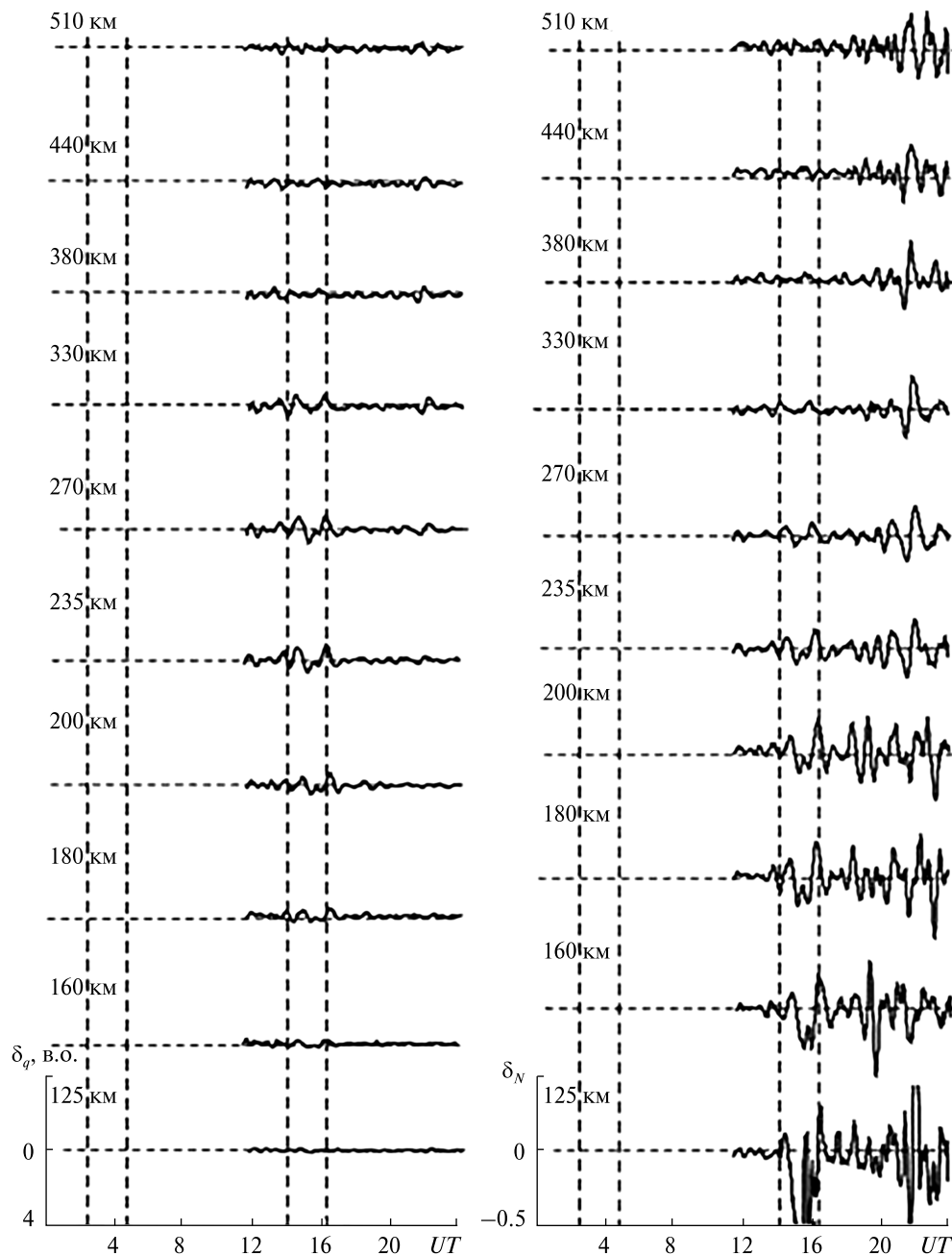


Рис. 25. Часові варіації збурень δ_q і відносних збурень δ_N концентрації електронів під час ІБ 8 листопада 2004 р. (вертикальні штрихові лінії — моменти сходу і заходу Сонця на висоті 450 км і на поверхні Землі)

мального пристрою, $T_{\text{сист max}} = 570 \dots 1320$ К в залежності від часу доби, $\delta P_s = P_s - \bar{P}_s$, \bar{P}_s і \bar{P}_n — потужності сигналу і шуму відповідно, згладжені за допомогою ковзного середнього на інтервалі 180 хв. При цьому δ_q і δ_N описують часові варі-

ації амплітуд і відносних амплітуд ХЗ концентрації електронів. Оскільки δ_q вимірюється у відносних одиницях (в. о.), було потрібне їхнє нормування. У даній вимірвальній кампанії 1 в. о. $\approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

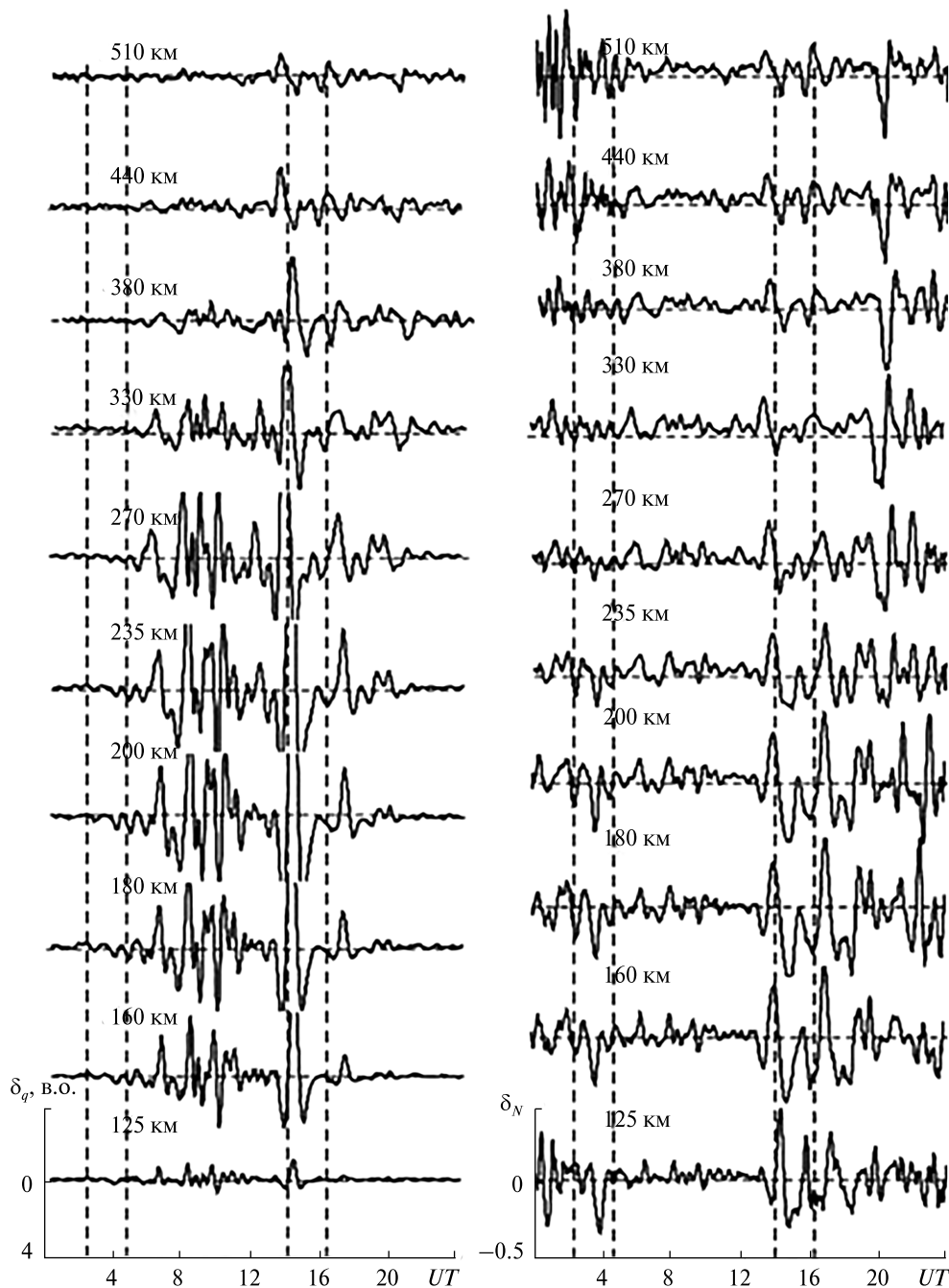


Рис. 26. Те ж, що на рис. 25, для 9 листопада 2004 р.

Для оцінки періодів і амплітуд ХЗ застосовувалися віконне перетворення Фур'є (ВПФ), адаптивне перетворення Фур'є (АПФ) і вейвлет-перетворення (ВП), докладно описані в роботах [54, 100]. При цьому використовується формат

представлення результатів аналізу, запропонований в зазначених роботах.

Висотно-часові залежності абсолютних ΔN і відносних δ_N варіацій концентрації електронів N представлено на рис. 25...29. Видно, що ΔN і

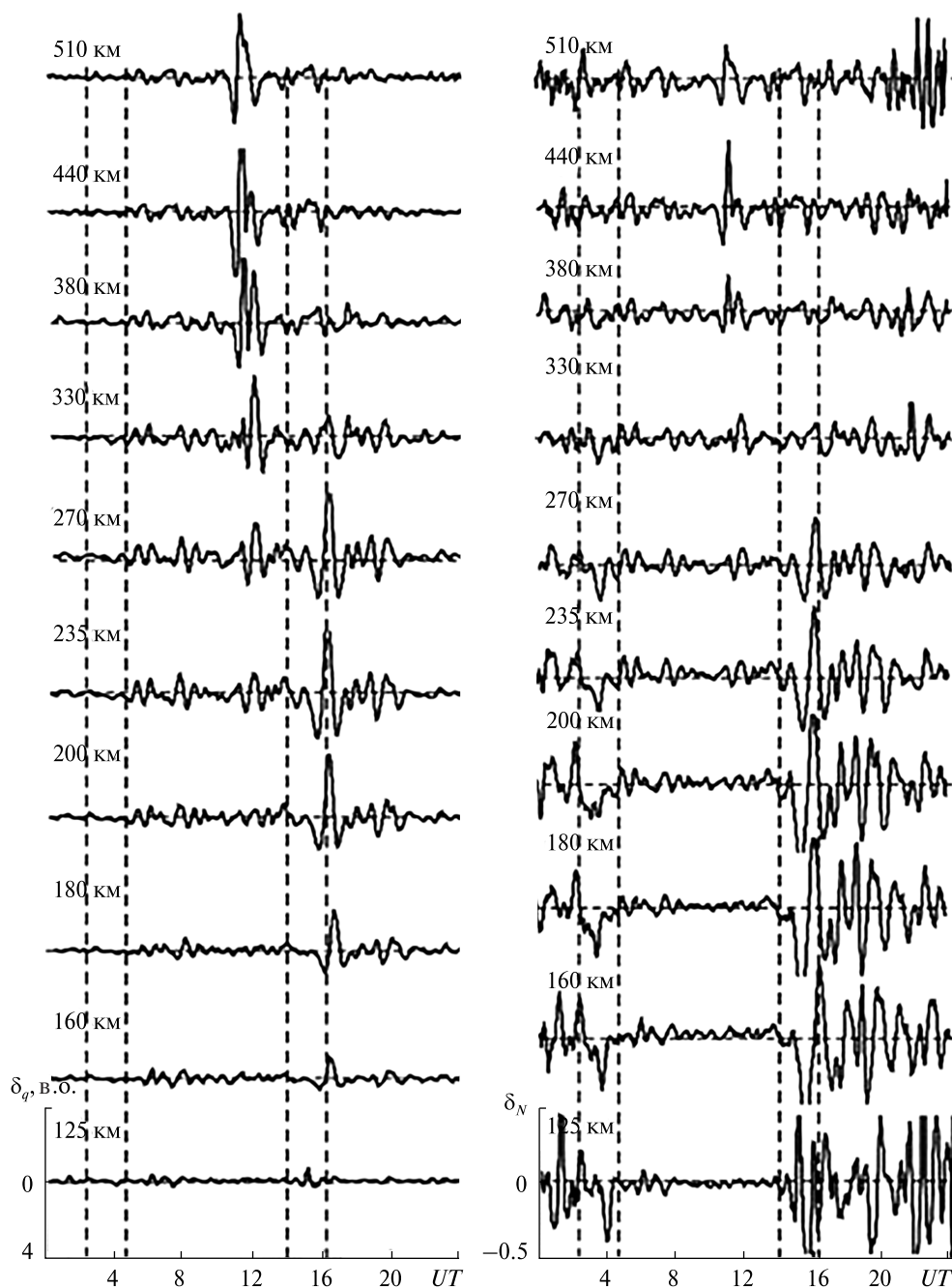


Рис. 27. Те ж, що на рис. 25, для 10 листопада 2004 р.

δ_N істотно варіювали протягом доби, від доби до доби, а також при зміні висоти.

Часові варіації параметрів хвильових збурень. В результаті негативної ІБ концентрація N електронів в денний час 8 і 10 листопада майже на всіх

висотах зменшувалася в 2..6 разів у порівнянні зі значеннями N 9 листопада (табл. 5). Значення N 9 листопада були близькими до тих, що спостерігалися у контрольні дні (з 28 по 30 жовтня 2004 р.). 11 і 12 листопада концентрація елект-

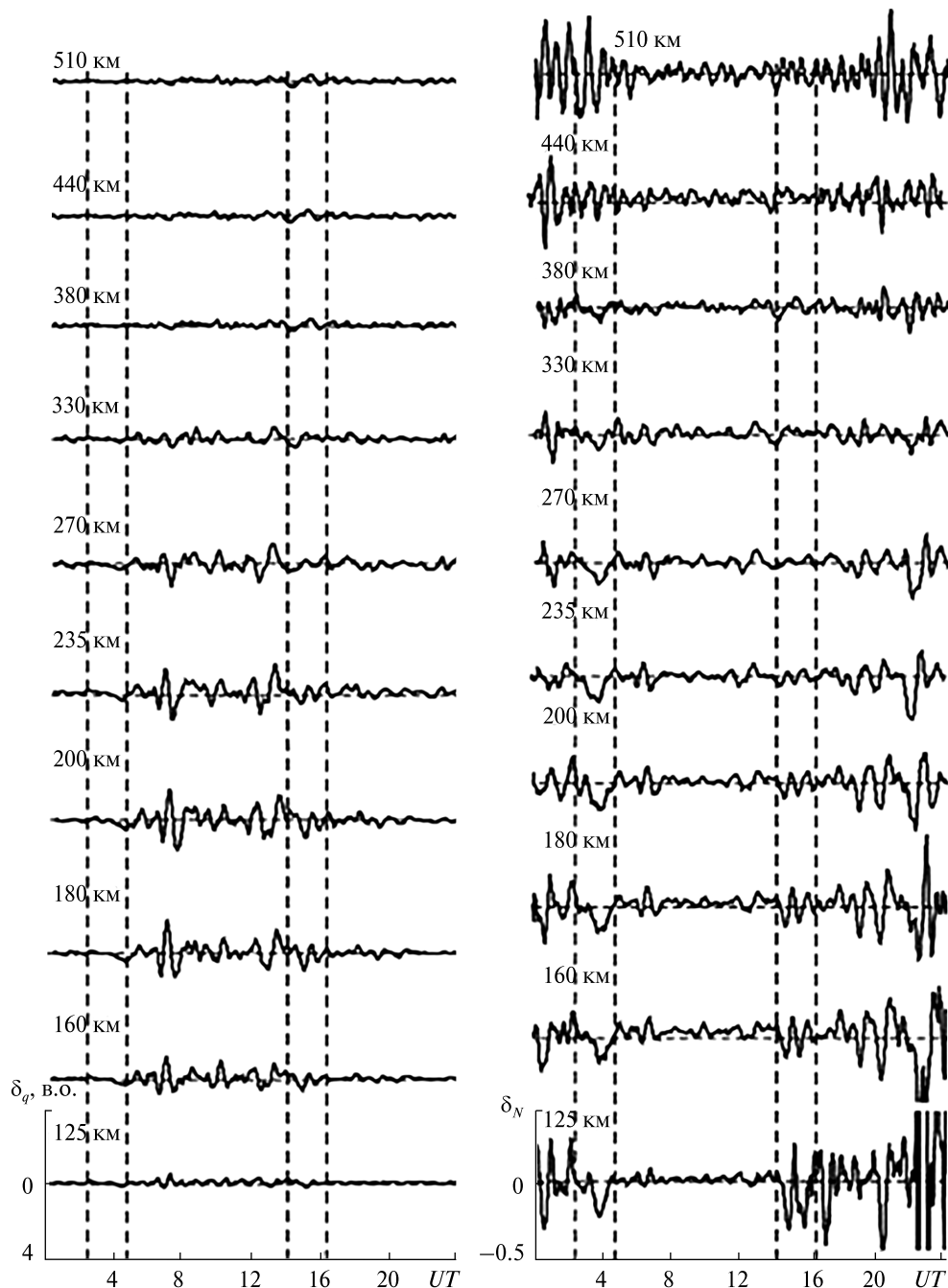


Рис. 28. Те ж, що на рис. 25, для 11 листопада 2004 р.

ронів все ще відновлювалася після іоносферної бурі 10 листопада. Приблизно у стільки ж разів зменшувалася абсолютна амплітуда ΔN_m X3. Значення відносних амплітуд X3 δ_{Nm} в дні іоносферних збурень і в контрольні дні відрізня-

лися незначно. Вони, як правило, змінювалися у межах 0.05...0.10.

У нічний час вплив іоносферних збурень був слабшим. Концентрація електронів зменшувалася тільки в діапазоні висот 125...350 км і не біль-

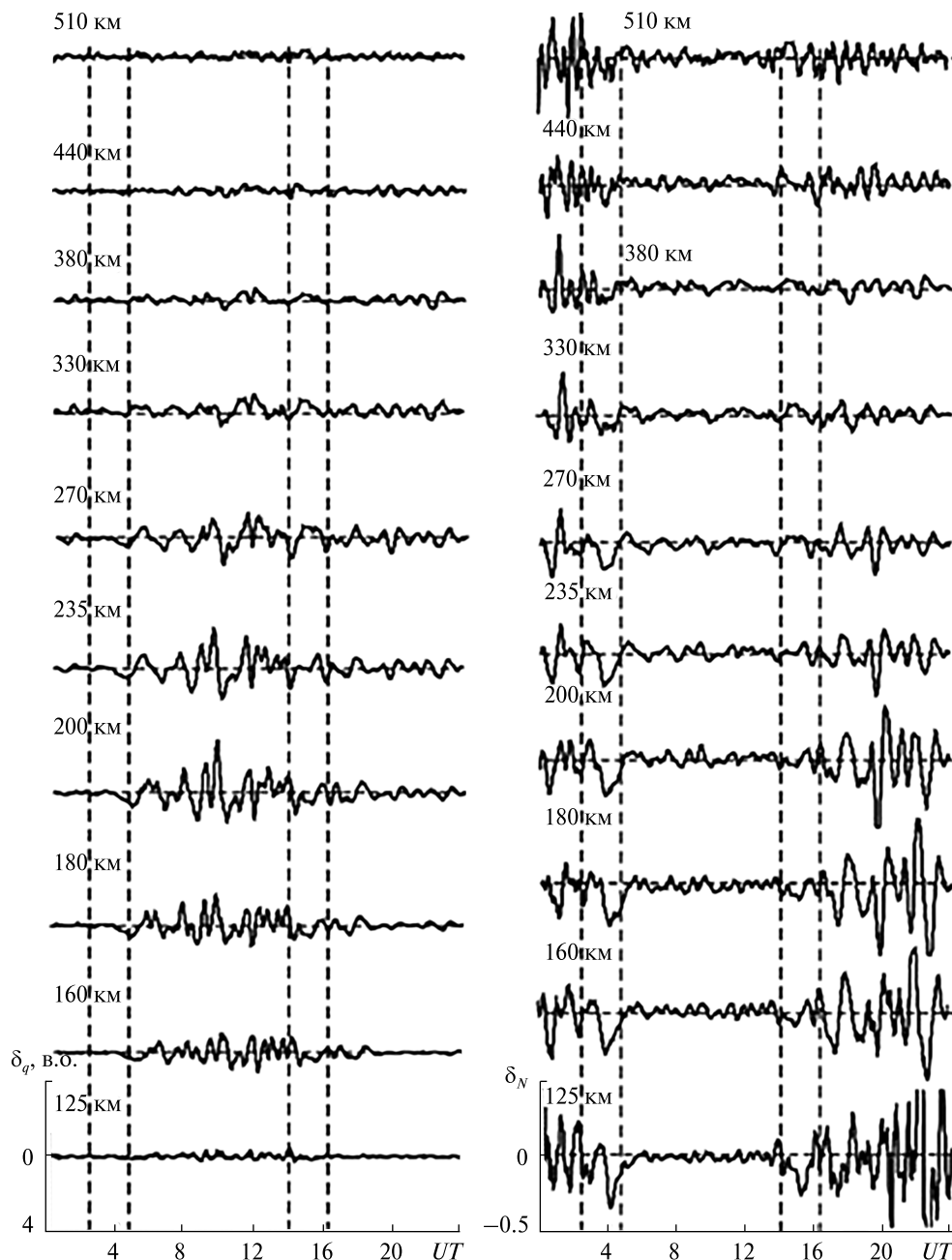


Рис. 29. Те ж, що на рис. 25, для 12 листопада 2004 р.

ше, ніж в 2...3 рази, в ніч з 8 на 9 листопада, а в ніч з 10 на 11 листопада — у 1.4...2 рази на висотах $z = 200...250$ км (див. табл. 5). Після першої іоносферної бурі на зазначених висотах значення ΔN_m зменшувалися в 2...10 разів, а після другої бурі — в 1.4...4 рази. Значення δ_{Nm} слабко залежали від

ступеня збуреності іоносфери і мало змінювалися від ночі до ночі: зазвичай у межах 0.10...0.20, але в ряді випадків досягали 0.25...0.30.

Висотні варіації параметрів хвильових збурень. Аналіз рис. 25—29 і табл. 5 дозволив встановити таке. У денний час значення ΔN_m збільшували-

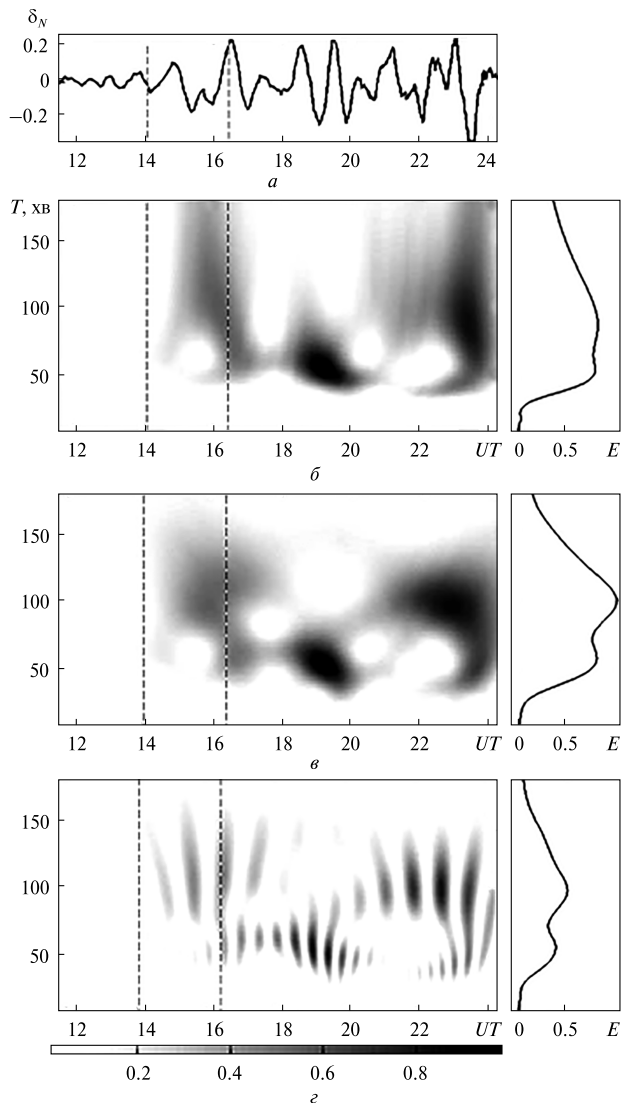


Рис. 30. Результати спектрального аналізу часових варіацій $\delta_N(t)$ 8 листопада 2004 р. для висоти 200 км: a — сигнал, b , v , z — спектрограми сигналу (у відносних одиницях) відповідно віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є і вейвлет-перетворення, справа — енергограми сигналу у відносних одиницях

ся в 2...7 разів при збільшенні висоти від 125 до 200...270 км, а потім поступово зменшувалися до значень, у 1...5 разів менших на висоті 510 км, ніж на висоті 125 км.

Значення відносної амплітуди δ_{Nm} також збільшувалися в 1.2...2 рази в діапазоні висот від 125 до 200 км. На більших висотах зазвичай $\delta_{Nm} = 0.05...0.10$. У день першої іоносферної бурі

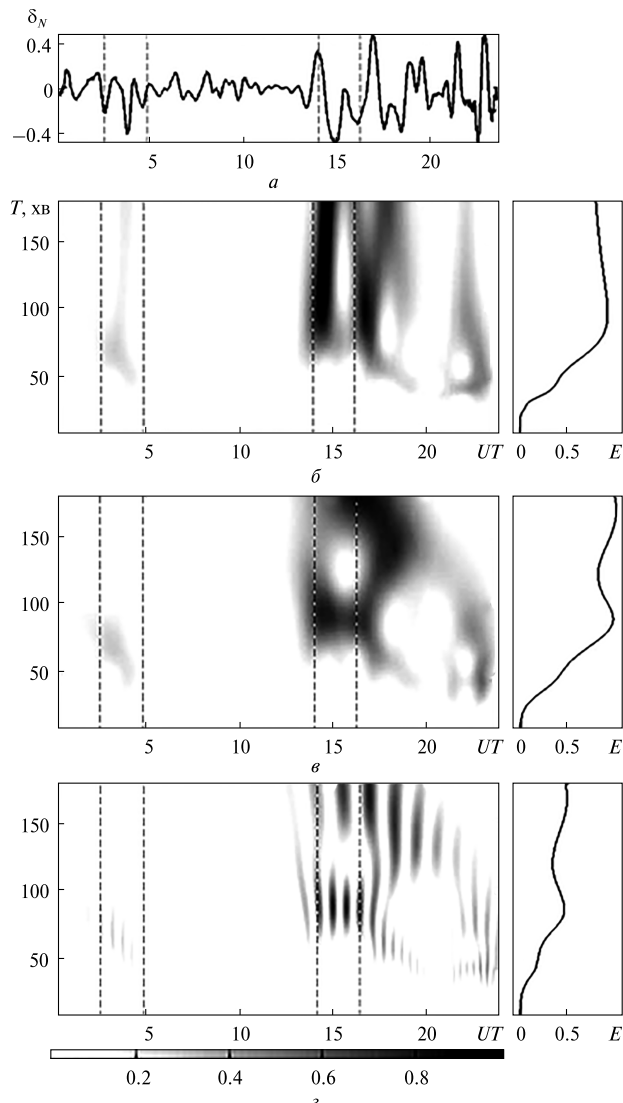


Рис. 31. Те ж, що на рис. 30, для 9 листопада 2004 р.

(8 листопада) значення δ_{Nm} були в 2...3 меншими, ніж 9 листопада (пор. рис. 25 і 26).

У нічний час амплітуда ΔN_m збільшувалася в 2...5 разів при збільшенні висоти від 125 до 200...270 км, а потім зменшувалася приблизно до тих же значень — на висоті 510 км, що і на висоті 125 км.

Відносна амплітуда δ_{Nm} набула значень 0.2...0.3 на висоті 125 км, а потім поступово зменшувалася при збільшенні висоти 200...270 км до значень 0.1...0.2 і залишалася на такому ж рівні на більших висотах (аж до 510 км). В ніч з 8 на

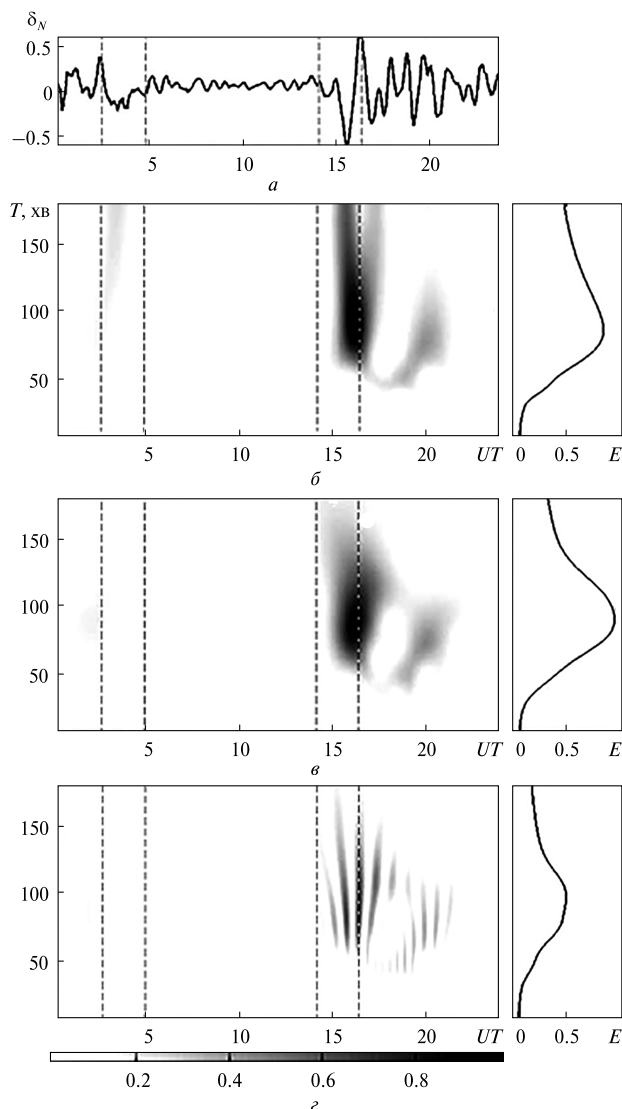


Рис. 32. Те ж, що на рис. 30, для 10 листопада 2004 р.

9 листопада майже на всіх висотах значення δ_{Nm} були дещо більшими, ніж в інші ночі. Мабуть, це було пов'язано з меншими значеннями N в ніч з 8 на 9 листопада.

Наведемо результати спектрального аналізу часових варіацій $\delta_N(t)$, наприклад, на висоті 200 км (рис. 30–34).

8 листопада під час проходження вечірнього термінатора мало місце посилення ХЗ з періодами близько 60 і 100 хв, а в інтервалах часу 18:00...20:00 UT та 21:00...24:00 UT — 40...70 хв і 40...120 хв відповідно (див. рис. 30). Амплітуда

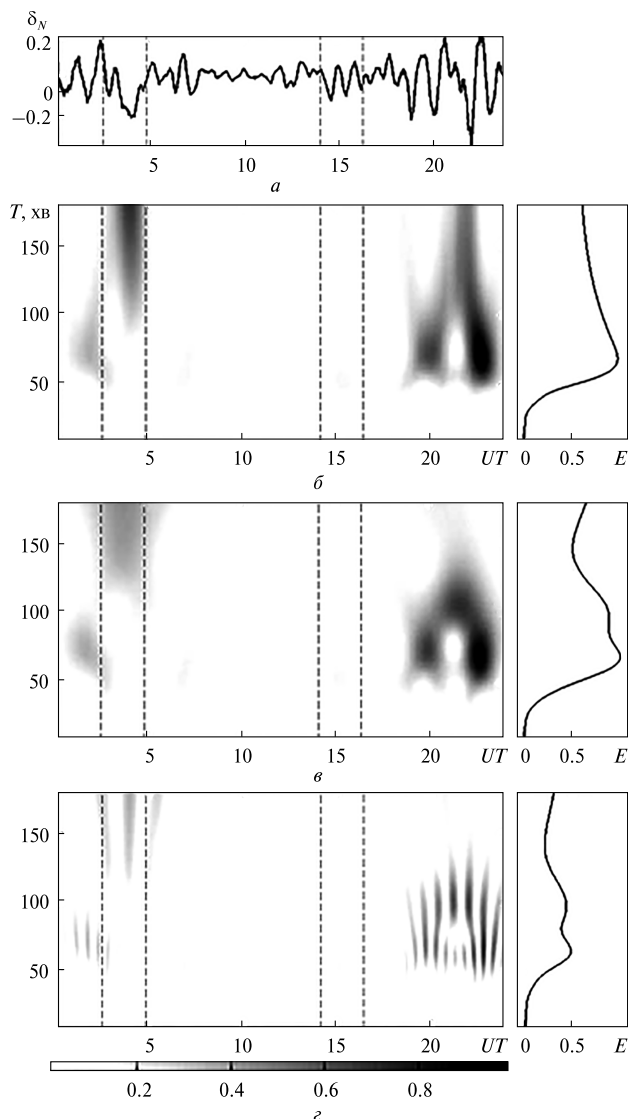


Рис. 33. Те ж, що на рис. 30, для 11 листопада 2004 р.

коливань не перевищувала 0.2. Проходження ранкового і вечірнього термінаторів 9 листопада супроводжувалося посиленням коливань з періодами 60...80 хв і 80...120 хв відповідно (див. рис. 31). Після заходу Сонця на Землі також чітко спостерігався широкосмуговий процес з $T = 120...180$ хв і амплітудою близько 0.4. У нічний час мали місце ХЗ з періодами 45...55 і 80...100 хв.

10 листопада перед проходженням ранкового термінатора переважав процес з $T = 80...100$ хв, потім йому на зміну прийшов процес з $T = 130...180$ хв (див. рис. 32). У денний час амплітуда

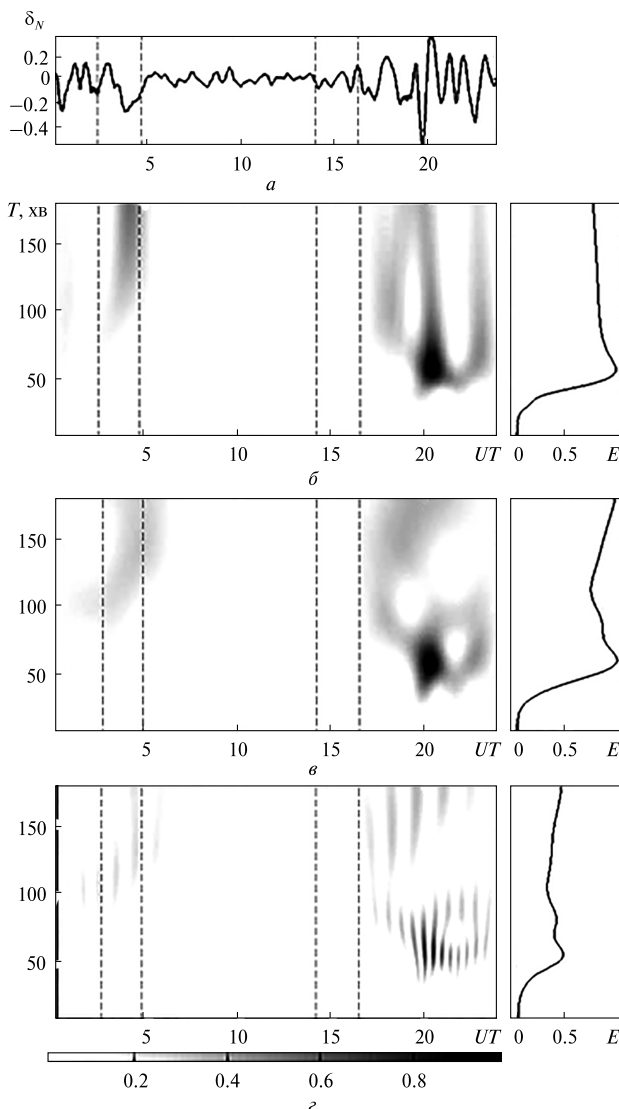


Рис. 34. Те ж, що на рис. 30, для 12 листопада 2004 р.

δ_{Nm} була меншою в 2...3 рази, ніж вранці, а $T = 40...50$ хв. Максимальні значення δ_{Nm} мали місце протягом заходу Сонця. При цьому $\delta_N \approx 0.5$, а $T = 60...120$ хв. У нічний час переважали коливання з періодами 40...60 і 70...90 хв. Їхня амплітуда становила 0.2...0.3.

11 і 12 листопада спостерігались добре виражені хвильові процеси перед настанням ранкового термінатора і при його проходженні (див. рис. 33, 34). При цьому $\delta_{Nm} \approx 0.10...0.15$, а періоди дорівнювали 60...90 і 140...180 хв відповідно. Протягом проходження вечірнього термінатора

$\delta_{Nm} \approx 0.10$, $T = 40...60$ хв. У нічний час амплітуда ХЗ була найбільшою і досягала 0.2...0.3, а періоди переважних коливань становили 50...70 хв.

9. ОБГОВОРЕННЯ ЕФЕКТІВ НАДСИЛЬНОЇ ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ

9.1. Процеси в нижній іоносфері. Використання даних спостережень, отриманих супутниковими і наземними методами, дозволило виявити особливості розвитку і перебігу ГБ 7...10 листопада 2004 р. Аналізована ГБ, як видно з рис. 3, була рекурентною. Вона складалася з двох геомагнітних бур і ряду суббур, мала значну енергетику і спричиняла істотні збурення в іоносфері. Енергетична функція Акасофу, що виділяється в замкнутій магнітосфері та іоносфері у період даної ГБ, перевищувала 4 ТВт (див. рис. 4, а). Поряд з ϵ_A важливими енергетичними характеристиками ГБ також є величина P_{OM} і її складові P_{OM1} , P_{OM2} . Як показано в роботі [65], при негативних значеннях B_z більш суттєвим є приплив енергії магнітосферного електромагнітного поля, а при позитивних — приплив кінетичної енергії сонячного вітру. Крім того, в роботі [73], присвяченій дослідженню параметрів сигналів довгохвильового радіодіапазону (частота 30...300 кГц), відбитих від нижньої іоносфери, виявлено залежність між знаком відхилення амплітуд і фаз цих сигналів від фонових значень, з одного боку, і значеннями ϵ і P_{OM} — з іншого боку.

Ефекти ГБ в середньопівнічній нижній іоносфері зазвичай викликані висипаннями високоенергійних електронів з радіаційного поясу Землі, які мають місце в усі фази геомагнітної бурі. При цьому спостерігаються помітні відхилення параметрів довгохвильового і наддовгохвильового (частота 3...30 кГц) сигналів від фонових значень [47, 73], а також значні варіації концентрації електронів і амплітуд звичайної і незвичайної складових сигналів ЧВ-радару [27]. Значні висипання електронів (так звані післябуреві ефекти) відбуваються у фазу відновлення магнітної бурі. Вони найбільш яскраво виражені, якщо в цю фазу починається нове магнітне збурення [9, 46], що і мало місце для аналізованої ГБ. Потіки магнітосферних електронів в іоносферу, мабуть, викликали спостережуване нами істотне збіль-

шення N (на 50...100 % і більше) вдень 9 листопада (див. рис. 6). Найбільш яскраво такі ефекти були виражені 10 листопада, коли величина N у максимумах сплесків у 3...5 разів перевищувала фонові значення. Часове запізнювання максимальних значень N зі зниженням висоти, мабуть, можна пояснити тим, що з 06:00 UT до 12:00 UT 10 листопада збільшувалася енергія висипаних електронів. При цьому збурення поширювалися на менші висоти.

Геокоосмічні збурення часто супроводжуються ефективною генерацією і посиленням акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) з періодами $T \approx 3$ год. Їхніми джерелами у період ГБ зазвичай є варіації електромагнітного поля, щільності електричного струму і потоків заряджених частинок у високих широтах тощо. Такі хвилі поширюються в середні і низькі широти і викликають суттєві ХЗ концентрації, температури і швидкості нейтральних і заряджених частинок. Іншим джерелом ХЗ в середньширотній нижній іоносфері можуть бути квазіперіодичні висипання магнітосферних електронів через прояви взаємодії у підсистемах радіаційний пояс (високоенергійні частинки) — атмосфера — іоносфера — радіаційний пояс (високоенергійні частинки). Ключовою ланкою, що забезпечує квазіперіодичності, є генерація пульсацій Pс5 і Pс6 (див. далі) [50]. До генерації ХЗ також можуть призводити, особливо в нічний час, варіації атмосферно-іоносферного електричного поля. Спостережуване нами в нічний час 9-10 листопада і вдень 10 листопада збільшення амплітуд ХЗ з $T = 20...100$ хв може бути викликане цими процесами. В цілому для даної ГБ не виявлено чіткої кореляції між рівнем магнітної активності і параметрами ХЗ в нижній іоносфері. Це підтверджує результати роботи [73], де при вивченні параметрів довгохвильових сигналів також не виявлено лінійного зв'язку між збуреннями нижньої іоносфери і рівнем магнітної активності. Мабуть, у цій області переважають АГХ, що поширюються з нижньої атмосфери. При цьому ГБ надають непрямий вплив на параметри ХЗ в даній області, який виявляється при статистичному аналізі амплітуд і періодів ХЗ, характерних для збурених умов [67].

Магнітометричні дослідження дають важливу інформацію про процеси у міжпланетному середовищі, магнітосфері, іоносфері, тектоносфері, а також про потужні антропогенні впливи. У період сильних магнітних збурень вплив перших двох процесів на поведінку геомагнітного поля значно посилюється. Як видно з рис. 4, *a*, після імпульсів раптового початку магнітної бурі зазвичай істотно зростають амплітуди коливань H - і D -складових з $T = 1...1000$ с. Вони, як правило, викликані раптовою компресією магнітосфери, посиленням потоків заряджених частинок у полярних областях, генерацією магнітогідродинамічних хвиль. Особливий інтерес становлять дослідження у період ГБ коливань геомагнітного поля з $T = 300...1000$ с, які асоціюються з пульсаціями Pс5-6. Як показано в роботі [49], такі пульсації викликаються флуктуаціями ММП у сонячному вітрі, варіаціями інтенсивностей поздовжніх електричних струмів, генерацією іоносферних конвективних вихорів та іншими процесами. Спостережувані нами окремі сплески амплітуд цих коливань 8...10 листопада (див. рис. 11...14) збігаються в часі зі значними варіаціями і зміною знака B_z , що супроводжуються розвитком суббур у полярних широтах у період другого магнітного збурення. Це також свідчить про ефективний безпосередній (за допомогою гідромагнітних хвиль) і непрямий (через процеси в замкнутій магнітосфері й іоносфері) вплив флуктуацій ММП і параметрів сонячного вітру на варіації магнітного поля в замкнутій магнітосфері.

У роботах [48, 50] відзначено взаємозв'язок між пульсаціями Pс5-6, Pі3 і коливаннями параметрів нижньої іоносфери з такими ж періодами ($T = 5...20$ хв). Таку кореляцію магнітних і іоносферних параметрів можна пояснити щонайменше двома процесами, описаними в цих роботах. По-перше, збільшення амплітуд магнітних пульсацій в середніх широтах у період головної фази бурі стимулює квазіперіодичні висипання магнітосферних електронів. При цьому спостерігаються синхронні варіації магнітного поля та електронної концентрації в нижній іоносфері. По-друге, магнітні пульсації генеруються у полярних широтах за рахунок квазіперіодичних

висипань електронів в області поздовжніх електричних струмів. При цьому також генеруються АГХ, що поширюються в середні і низькі широти. У другому випадку магнітні пульсації зазвичай випереджають ХЗ концентрації електронів на 30...60 хв, а зв'язок між ними мав місце як у магнітоспокійні, так і у магнітозбурені дні. У період розглядуваної ГБ в окремі проміжки часу ми помітили як одночасну появу ХЗ магнітного поля і концентрації електронів з $T = 5...15$ хв, так і запізнення останніх, зокрема і на 30...60 хв. Можна припустити, що мали місце обидва механізми взаємозв'язку магнітних та іоносферних параметрів. Однак не виключено, що короткоперіодні ХЗ в нижній іоносфері можуть мати ще й іншу природу. Для знаходження чіткого взаємозв'язку параметрів ХЗ нижньої іоносфери і магнітного поля, а також виявлення ступеня впливу магнітосферних і метеорологічних процесів на збурення нижньої іоносфери необхідні подальші дослідження.

9.2. Процеси в середній і зовнішній іоносфері. *Варіації концентрації електронів $N_m F_2$ у максимумі шару F_2 .* Ефекти негативної ІБ, що супроводжує магнітосферні збурення, досить добре вивчені. Серед ряду факторів, які відповідають за зменшення концентрації електронів і мають різні просторові і часові масштаби, одним з основних прийнято вважати збурення нейтрального складу [40, 129, 192]. Нагрівання високоширотної атмосфери під час надходження енергії з магнітосфери викликає підйом газу вгору і рух його у бік холодніших областей. На іоносферних висотах це призводить до зменшення концентрації атомів O і збільшення концентрацій молекулярних складових N_2 і O_2 . Це викликає зменшення параметра $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$, який визначає співвідношення процесів іоноутворення і втрат у фотохімічному наближенні, і сприяє розвитку негативної бурі. Градієнти тиску, що виникають при розширенні області нагрівання, а також зміна картини магнітосферної конвекції і її вплив на нейтральні вітри у високих широтах за допомогою іон-нейтрального тертя [133, 134, 189] викликають перебудову глобальної термосферної циркуляції. При цьому посилюються вітри, спрямовані до екватора, які переносять змі-

нений газовий склад в середні і низькі широти. Збурення нейтрального складу і термосферного вітру можуть також передаватися з найвищих широт у середні широти за допомогою рухомих атмосферних збурень (РАЗ), коли енергія надходить у вигляді окремих імпульсів. Це відбувається під час інтенсивних магнітосферних суббур, які супроводжуються швидкими змінами авроральних струмів.

На рис. 35 наведено варіації параметра $p_1 = N(O)/(N(N_2))$ і ТЕС за даними приладу GUVI на борту супутника TIMED у спокійні дні 28...30 жовтня 2004 року і під час магнітної бурі 8...10 листопада 2004 р. Видно, що у порівнянні зі спокійним днем 29 жовтня зменшення параметра p_1 під час головної фази бур 8 листопада о 12:00 UT і 10 листопада о 11:40 UT становило приблизно 3.5 та 4.2 раза відповідно, тоді як значення $N_m F_2$ зменшилися в цей час у сім і чотири рази (див. рис. 15). Звідси випливає, що збурення нейтрального складу цілком могли бути причиною негативної фази другої бурі 10 листопада. Аналогічні випадки розвитку негативних іоносферних збурень в денний час детально розглянуто, наприклад, в роботі [91]. Було показано, що негативні збурення середньоширотної іоносфери могли стати результатом розширення області нагрівання і збуреного складу в середні широти за рахунок меридіонального перенесення нейтральними вітрами (у вигляді РАЗ і/або великомасштабної перебудови термосферної циркуляції), а також за рахунок зонального перенесення з нічного в денний сектор за допомогою адвекції.

Однак під час першої бурі 8 листопада зміни нейтрального складу тільки частково можуть пояснити зменшення $N_m F_2$. Такі випадки відзначалися в роботах ряду дослідників [132, 199]). Звідси випливає необхідність залучення додаткових механізмів для пояснення депресії N . В умовах даної бурі, мабуть, міг бути істотний внесок у справу збільшення швидкості втрат іонів O^+ таких факторів, як нагрівання атмосфери, посилення електричних полів, а також коливальне збудження молекул N_2 і O_2 [176, 177, 184—186]. Відомо, що внесок $N_2(v)$ і $O_2(v)$ може мати місце при значеннях $T_i \geq 1500...2000$ K [12, 119, 185,

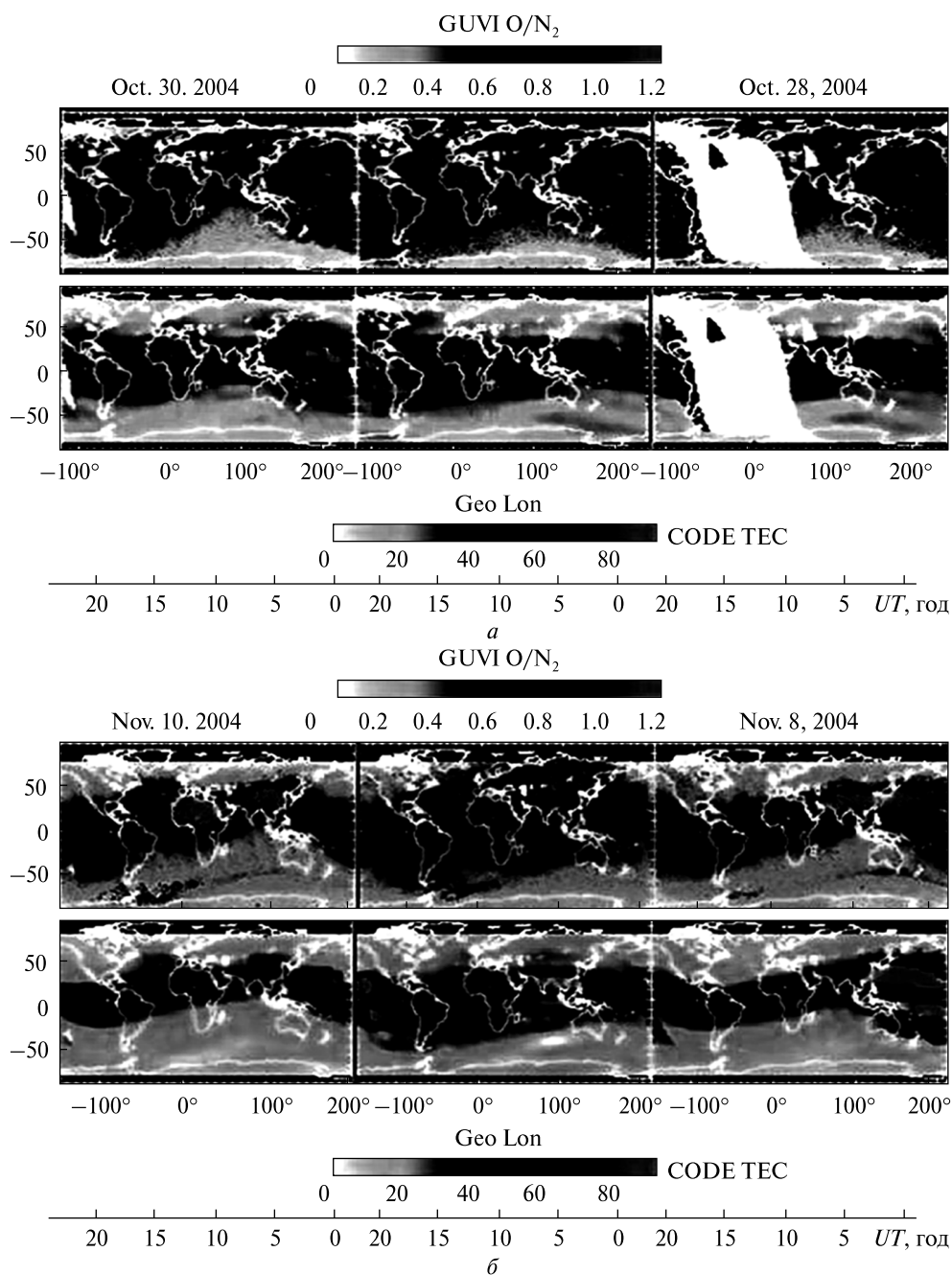


Рис. 35. Варіації відношення концентрацій $N(O)/N(N_2)$ і TEC за даними приладу GUVI на борту супутника TIMED: *a* — у спокійні дні 28...30 жовтня 2004 р., *б* — під час ГБ 8 і 10 листопада 2004 р. Для Харкова — дані приблизно для 12:00...11: 40 UT.

186, 201], які спостерігалися в нашому випадку (див. рис. 17 і 22) .

Особливості висотного розподілу концентрації електронів в області F2 іоносфери. Можна вважа-

ти, що деформація профілів $N(z)$ в ніч 9-10 листопада (див. рис. 19 і 20) зі зменшенням $N_m F2$ і підйомом шару F2 є підтвердженням згаданого вище зміщення «зони збуреного складу» в серед-

ні широти і перебудови термосферної циркуляції, викликаних високоширотним нагріванням термосфери. Разом з тим є ефекти, які побічно свідчать про зміщення структур високоширотної іоносфери — головного іоносферного провалу (ГПП) і аврорального овалу на широту, близьку до широти радару в Харкові під час головної фази бурі (при $K_p = 8.7$). Так, зіставлення профілів $N(z)$, отриманих з даних НР-радару, з ВЗ-іонограмою показали, що в ніч 9-10 листопада іоносфера середніх широт набувала властивостей, характерних для високоширотної іоносфери. Серед них, наприклад, збільшення дифузності відбитого сигналу (див. рис. 20). Воно могло бути пов'язане з розсіюванням сигналу на дрібномасштабних орієнтованих уздовж магнітного поля неоднорідностях, що генеруються поблизу екваторіальної межі аврорального овалу під час сильної бурі і мають великий просторовий масштаб (сотні і тисячі кілометрів) [7, 79].

Похилі когерентні відбиття (радіоаврору) зареєстровано під час головної фази другої бурі (вночі 9 листопада і у першій половині доби 10 листопада) в інтервалі відстаней $R = 650...1500$ км (див. рис. 21). Мабуть, ці луна-сигнали приймалися з північного напрямку бічними пелюстками діаграми спрямованості антени, які під досить малими кутами ($\sim 5...10^\circ$) просвічували Е-область іоносфери. Відомо, що відбиття відбувається на дальностях, де виконуються умови ракурсного розсіювання, і можуть бути зумовлені розсіюванням на неоднорідностях електронної концентрації Е-шару, що генеруються двопотоковою нестійкістю іоносферної плазми [7, 53]. Протягом бурі в іоносфері над радаром значення напруженості електричних полів, найімовірніше, збільшилися. Про це може свідчити збільшення висоти $z_m F2$. Можна вважати, що на північ від Харкова на дальностях $R = 650...1500$ км (тобто приблизно $6...15^\circ$ по широті), поля E_y були ще інтенсивнішими і могли перевищувати граничне значення -20 мВ/м, необхідне для виникнення струмових двопотокових нестійкостей. Такого типу розсіювання є рідкісним явищем для середніх широт. Вони спостерігалися, наприклад, в Іркутську і Харкові під час магнітних

бур 25 вересня 1998 р., 15 липня 2000 р., 29-30 травня 2003 р. і описані в роботах [7, 53, 79].

Зупинимося на незвичайному для денного часу профілі $N(z)$, зареєстровано 10 листопада об 11:15 UT. Він спотворений когерентними відбиттями на висотах приблизно 700 і 1000 км з потужністю, сумірною з потужністю сигналу на висоті максимуму шару F2 (див. рис. 20 і 21). Крім того, цим профілям $N(z)$ відповідала ВЗ-іонограма з розсіяним відбиттям, характерним для денної високоширотної іоносфери. Такі ефекти можуть побічно свідчити про те, що о 11:15 UT відбулося короткочасне (протягом 15 хв) зміщення екваторіальної межі аврорального овалу на широту, досить близьку до Харкова. При цьому розсіювання радіохвиль на дрібномасштабних неоднорідностях над Харковом дали дифузний слід на іонограмі ВЗ-радару. Область турбулізації плазми, ймовірно, простягалася по широті на північ від радару, принаймні на відстань 700...1000 км, де виконувалися умови для зворотного розсіювання радіохвиль на неоднорідностях Е-шару. Швидкий характер процесу міг бути пов'язаний з порізаністю і/або швидкою мінливістю авроральної зони за рахунок нестаціонарності магнітосферної конвекції. Важливо відзначити, що така рідкісна денна подія спостерігалася, коли індекс D_{st} , що характеризує інтенсивність магнітосферного кільцевого струму, мав мінімальне значення -289 нТл. Відомо, що кільцевий струм вносить основний вклад у зміну екваторіальної межі аврорального овалу [79].

Імовірність зміщення високоширотних структур (аврорального овалу, ГПП) на широту, близьку до широти радару, під час бурі була високою. Про це побічно можуть свідчити максимальні значення рівня авроральної активності (POES Auroral Activity Level), що дорівнюють 10, реєструвались на супутнику NOAA POES приблизно з 18:30 UT 7 листопада до 12:49 UT 8 листопада майже постійно, а також з 10:44 UT 9 листопада до 17:30 UT 10 листопада з короткочасними зменшеннями індексу до значень 9, і ще рідше — до 8 [<http://solar.sec.noaa.gov/Aurora/index.html>]. Значення цього параметра характеризують потужність енергійних частинок, які проникають

в атмосферу аврорального овалу. Його зареєстровані зміни свідчать про можливий зсув екваторіальної межі овалу до геомагнітних широт $\Phi = 51.0^\circ \dots 45.0^\circ$. Імовірність такого зміщення значно зростає, якщо врахувати особливості класифікації індексу POES Auroral Activity Level. Так, значення індексу 9 відповідає потужності авроральних частинок 96 ГВт, індекс 10 — понад 100 ГВт, а під час даної бурі потужність частоті істотно перевищувала 100 ГВт. Наприклад, 9 листопада о 19:28 UT та 21:10 UT ця потужність становила 399 і 172 ГВт, а 10 листопада о 02:20, 3:31, 6:57, 8:39 і 9:10 UT вона мала значення 278, 461, 468, 419 і 644 ГВт відповідно. Можна припустити, що овал міг наблизитися до місця розташування харківського радара ($\Phi = 45.7^\circ$), коли останній перебував в нічному і ранковому секторах. Проходження ГПП під час МБ зазначалося неодноразово, наприклад, на радарі у Міллстоун Хілл ($L = 3.3$) [127, 132]. У Харкові, де $L \approx 1.9$, подібне рідкісне для середніх широт явище спостерігалось під час магнітних бур 25 вересня 1998 року та 29-30 травня 2003 р. [32, 36, 78, 178, 179].

Слід зазначити також, що випадок аврори над Харковом спостерігався і був відображений на фото, наприклад, під час аналогічної описуваної найсильнішої магнітної бурі в ніч 30-31 жовтня 2003 р. при значеннях $K_p = 8.3 \dots 9.0$. Фото аврори приведено в роботах [97, 98].

Варіації висоти $z_m F2$ максимуму шару F2. Збільшення висоти $z_m F2$ становило 50...80 км вдень 8 листопада після головної фази першої бурі, досягло 300 км вночі 9-10 листопада під час головної фази другої бурі і 150...180 км опівдні 10 листопада (див. рис. 16) і пояснюється, мабуть, впливом ряду факторів. Серед них ефекти розширення термосфери, а також збільшення меридіональної швидкості термосферного вітру, спрямованої до екватора. Поряд з цим істотний внесок може вносити також проникнення магнітосферних електричних полів у середні широти за рахунок тривалого (протягом декількох діб) висипання енергійних частинок, зареєстрованих на супутниках GOES-8 і GOES-12. Висипання частинок призводить до підвищення провідності авроральної іоносфери, яка лежить нижче, і до закорочення екранувального поля поляризації,

чим сприяють проникненню магнітосферних електричних полів у середні широти [12, 150]. Виходячи зі збільшення $z_m F2$, можна вважати, що зональна складова електричного поля E_y над Харковом була спрямована на схід.

На тлі тривалого підйому шару F2 зареєстровано також швидкі варіації $z_m F2$ (див. рис. 16). Наприклад, 9 листопада приблизно о 16:00 величина $z_m F2$ різко зменшилася приблизно на 60 км, за нею із запізненням близько 40 хв почала зменшуватися концентрація $N_m F2$. Можна припустити, що відбулося перемикання поля зі східного напрямку на західний зі значенням $E_y \approx -15$ мВ/м (оцінку E_y отримано за величиною зміни $h_m F2$ [12]). Такі події можуть свідчити про проникнення імпульсу електричного поля в іоносферу над Харковом в результаті нестационарних збурень магнітосферних електричних полів [131, 144, 145]. Причиною таких збурень могла бути висока суббуряна активність (при значеннях індексу $AE \approx 1500 \dots 2500$ нТл в авроральній області), викликана раптовими змінами динамічного тиску сонячного вітру і B_z -складової ММП (див. рис. 3). Випадки швидких «перемикань» східно-західного напрямку електричного поля, пов'язані зі змінами електродинамічної обстановки під час магнітосферної суббури, з нестационарністю магнітосферної конвекції тощо, розглянуто, наприклад, в роботі [196]. Аналогічні ефекти спостерігалися також в Харкові під час магнітних бур 20-21 березня і 29-30 травня 2003 р. [36, 38].

Особливості варіацій T_e і T_i . До них належить аномальне нічне нагрівання плазми, яке реєструвалось не тільки під час головної фази бурі, але й аж до кінця вимірювань, коли магнітне поле було все ще збуреним (індекс $D_{st} \approx -65$ нТл). Збіг у часі періодів депресії $N_m F2$ і нічного нагрівання плазми (див. рис. 16 і 22), який нерідко мав місце протягом активного періоду бурі (в ніч 8-9 і 9-10 листопада), можна розглядати як непряме підтвердження зміщення ГПП на широту радара і гарячої зони разом з плазмопаузою аж до геомагнітної оболонки радара $L = 1.9$. У Харкові аналогічний ефект спостерігався, наприклад, під час магнітної бурі 29-30 травня 2003 р. При $A_p = 89$ і $K_p = 8.3$ [38].

Варіації іонного складу. Зареєстровані зменшення («провали») в 1.5...3.5 раза значень $N(H^+)/N$, наприклад, на висоті 1100 км, які спостерігалися вночі 8-9 і 9-10 листопада (див. рис. 24), мабуть, можна пояснити все тими ж ефектами зміщення ГПП, провалу легких іонів і спустошення магнітної силової трубки над Харковом. Нестационарність магнітосферної конвекції і нерівномірність висипання заряджених частинок ускладнюють картину розподілу плазми у субавроральній іоносфері, роблять її нерегулярною, порізаною, викликають розшарування ГПП. Це знаходить відображення в околі провалу легких іонів у вигляді піків, провалів відносної концентрації іонів водню $N(H^+)/N$. Так, поблизу півночі 9-10 листопада $N(H^+)/N$ на висоті 900 км зменшується від значення 0.7 в спокійний день до 0.2, тобто у 3.5 раза, а висота z_f переходу від іонів O^+ до іонів H^+ збільшується від 650 до 1450 км, що характерно для умов магнітних збурень [117].

Варіації ТЕС, отримані з даних радара і супутника GUVI TIMED, добре узгоджуються у спокійні й збурені дні (див. рис. 23 і 35).

Просторово-часові залежності параметрів хвильових збурень. Проведені дослідження підтвердили очікувану закономірність, пов'язану з тим, що найсильніша іоносферна буря повинна накласти відбиток на хвильову активність в іоносфері. Часові варіації $\Delta N(t)$ в основному повторювали зміни $N(t)$. При зменшенні N у 2...6 разів у періоди негативних іоносферних збурень значення амплітуди $\Delta N(t)$ зменшувалися у 2...10 разів. Відносні амплітуди δ_{Nm} при цьому змінювалися незначно. Ці результати узгоджуються з результатами наших спостережень, виконаних на одному і тому ж radarі у періоди інших іоносферних збурень [13, 14, 16, 18].

Цікаво, що магнітна та іоносферна бурі 7 листопада були сильніші, ніж 10 листопада і тривали приблизно одну і три доби відповідно. Синхронно зі зменшенням N зменшувалися і варіації ΔN .

Висотні залежності ΔN_m і δ_{Nm} в основному були такими ж, як і в незбурених умовах — максимальні значення амплітуд спостерігалися в діапазоні висот 200...270 км. Нічні значення δ_{Nm} в середньому в 2...3 рази перевищували денні зна-

чення. Поведінка часових варіацій $\Delta N(t)$ і $\delta_{Nm}(t)$ була якісно подібною. Ці результати також узгоджуються з даними робіт [13, 14, 16, 18].

Періоди хвильових збурень. Спільне застосування ВПФ, АПФ і ВП дозволили локалізувати і визначити періоди T найсуттєвіших коливань. Найчастіше періоди становили 40...60 і 80...120 хв. Значення T майже не залежали від ступеня збуреності іоносфери. Спектральний склад ХЗ істотно змінювався протягом проходження сонячного термінатора і після цього. Амплітуда коливань при цьому зазвичай збільшувалася в 1.5...2 рази і досягала 0.3...0.5.

Варіації δP_s викликані когерентним розсіянням зондувальних сигналів на неоднорідностях плазми нетеплової природи. Добре відомо, що таке розсіювання на висотах Е-області іоносфери систематично спостерігається у високих широтах. Розсіяння ракурсного характеру викликається неоднорідностями іоносферної плазми, що генеруються, в основному, двопотоковою і градієнтно-дрейфовою нестійкостями. Останні виникають, коли складова E_y електричного поля іоносферно-магнітосферного походження досягає порогового значення, близького до 10...20 мВ/м. Якщо у високих широтах E_y може досягати 50 мВ/м, в середніх широтах у спокійних умовах ця складова зазвичай не перевищує 3...5 мВ/м. І тільки під час сильних геокосмічних бур E_y може досягти граничного значення, а значить, виникають умови для генерації нестійкостей.

Про істотне збільшення E_y в інтервалі часу 10:30...13:00 10 листопада 2004 р. також свідчить збільшення висоти максимуму концентрації електронів в області F іоносфери на 150...180 км [30—33]. У цитованих роботах також продемонстровано, що у процесі ГБ 10 листопада 2004 р. середньоширотна іоносфера набувала рис високоширотної. Зокрема, авроральної овал і головний іоносферний провал значно зміщувалися в сторону середніх широт. Це означає, що згадані нестійкості генерувалися і в середньоширотній іоносфері. Оскільки потужність когерентного розсіяння на багато порядків перевершує потужність некогерентного, когерентно розсіяні сигнали, які мають ракурсний характер, могли

прийматися з північного напрямку бічними пелюстками діаграми спрямованості антени. Такі сигнали, названі когерентною луною, в умовах збуреної середньоширотної іоносфери спостерігалися і раніше. Про ракурсний характер розсіювання свідчать максимуми в залежностях $\delta P_s(R)$ (див. рис. 32).

Таким чином, є підстави вважати, що спостережуване ізольоване по дальності збурення викликане похилим когерентним відбиванням (ракурсним розсіянням) зондувальних радіосигналів.

Результати інших досліджень. Дослідженню ефектів ГБ в листопаді 2004 р. присвячено велику кількість робіт [6, 49, 68]. В роботі [49] вивчено просторову динаміку варіацій геомагнітного поля, полярних сьайв і поглинання космічного радіошуму, реєстрованого мережею ріометрів, протягом головної фази МБ 7-8 листопада 2004 р. Виявилось, що інтенсивні збурення реєструвалися в ранньому ранковому секторі високих широт, а не як зазвичай — в нічному секторі. Спостерігалось також висипання високоенергійних електронів.

Роботи [6, 68] присвячені опису іоносферних збурень за допомогою іонозондів і приймачів GPS. У високоширотній іоносфері спостерігалися періоди повного поглинання сигналів іонозондів і екрануючі шари E_s . У середніх широтах реєструвалася негативна ІБ. Виявлено також великомасштабне іоносферне збурення фронтального типу з $\delta_N \approx 0.8$, що рухалося у південно-західному напрямку зі швидкістю близько 200 м/с.

Результати досліджень, описаних в цьому розділі, узгоджуються з результатами спостережень інших дослідників і суттєво їх доповнюють.

10. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ НАДСИЛЬНОЇ ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ

Проведено магнітні і іоносферні спостереження під час надсильної геокоосмічної бурі, яка складалася з двох послідовних магнітних збурень 7-8 і 9-10 листопада 2004 року з індексами: $A_p = 189$ і 181, $D_{smin} = -373$ і -289 нТл, $K_{pmax} = 8.7$ і 8.7. Буря була пов'язана з високою спалаховою активністю Сонця, незвичайною для переходу до фази мінімуму сонячного циклу.

1. Наведено результати спостережень параметрів концентрації електронів у нижній іоносфері і варіацій горизонтальних складових геомагнітного поля у період надсильної геокоосмічної бурі 7...10 листопада 2004 р. Оцінено потужності електромагнітної і кінетичної енергій, що надходять в іоносферу під час магнітних збурень. Досліджено особливості протікання цієї бурі в середньоширотній нижній іоносфері.

2. Аналіз часових залежностей концентрації електронів для ряду висот виявив підвищення її середніх значень (на 50...100 %) і амплітуд варіацій (в окремих сплесках — у 3...5 разів) у магнітозбурені дні. Значення відносних амплітуд хвильових збурень у період бурі зазвичай становили 0.05...0.15. Спостерігалось невелике збільшення амплітуд під час другого магнітного збурення (10 листопада). Зв'язок між рівнем магнітної активності і параметрами хвильових збурень в нижній іоносфері чітко не простежувався.

3. Зареєстровано значне (на порядок і більше) збільшення варіацій і середніх квадратичних відхилень горизонтальних складових магнітного поля у магнітозбурені періоди. Спостерігалися сплески пульсацій Pc5-6 з амплітудами, що досягають 30 і 50 нТл для H- і D-складових відповідно. В окремі проміжки часу мав місце взаємозв'язок пульсацій Pc5-6 з короткоперіодними (5...15 хв) хвильовими збуреннями електронної концентрації в нижній іоносфері. Цей взаємозв'язок могли викликати як стимулювання магнітними пульсаціями квазіперіодичних середньоширотних висипань магнітосферних електронів, так і генерація пульсацій Pc5-6 і АГХ у полярних областях і їхнє поширення у середні і низькі широти.

4. Зареєстровано ефекти сильного негативно-іоносферного збурення, зокрема зменшення концентрації електронів $N_m F2$ у максимумі шару F2 до 6...7 разів під час головної фази бурі. Денні значення відношення концентрацій $N(O)/N(N_2)$, отримані за допомогою приладу GUVI на супутнику TIMED, показали, що збурення нейтрального складу повністю пояснює зменшення $N_m F2$ у чотири рази 10 листопада, але лише частково може пояснити зменшення $N_m F2$ у сім разів 8 листопада і вимагає залучення

додаткових чинників (наприклад, коливального збудження молекул N_2 і O_2 при спостережуваних значеннях $T_i \geq 1500 \dots 2000$ К).

5. Під час бурі спостерігалось незвичайне нічне нагрівання плазми до денних температур $T_i = 1300 \dots 2000$ К і $T_e = 1600 \dots 3000$ К на висотах 250...750 км. Однією з причин таких збурень могло бути зміщення гарячої зони разом з плазмопаузою аж до геомагнітної оболонки радара $L = 1.9$.

6. Зареєстровано збільшення висоти $z_m F2$ максимуму шару F2 в активні періоди бурі приблизно на 300 км вночі і на 150...180 км — вдень час. Поряд з ефектами посилення меридіональної швидкості термосферного вітру, розширення термосфери, ще однією причиною підйому шару F2 могло бути проникнення магнітосферних електричних полів у середні широти за рахунок тривалого (протягом декількох діб) висипання енергійних частинок, зареєстрованого на супутниках GOES-8 і GOES-12.

7. Спільний аналіз висотних профілів концентрації електронів $N(z)$, отриманих з даних НР-радара, і іонограми радара вертикального зондування, показав, що збільшення дифузності відбитого сигналу на тлі значної деформації профілів $N(z)$ зумовлене, найімовірніше, розсіюванням сигналу на дрібномасштабних неоднорідностях, орієнтованих вздовж магнітного поля, поблизу екваторіальної межі аврорального овалу, а значить і зміщенням цієї межі на широту, близьку до широти харківського радара.

8. Середньширотні когерентні відбиття (відлуння) спостерігалися під час головної фази бурі в інтервалі відстаней $R = 650 \dots 1500$ км. Вони могли зареєструватися з північного напрямку бічними пелюстками діаграми спрямованості антени і були викликані, найімовірніше, розсіюванням сигналу на неоднорідностях електронної концентрації E-шару, що генеруються двофазною нестійкістю іоносферної плазми.

9. Зареєстровано рідкісну подію, коли вдень спостерігалися когерентні відбиття на відстані 700...1000 км і іонограми ВЗ-радара над Харковом з дифузним розсіянням. Такі ефекти могли побічно свідчити про короткочасне (протягом близько 15 хв) зміщення екваторіальної межі аврорального овалу на широту, досить близьку до

Харкова. Важливо, що це сталося при мінімальному значенні індексу $D_{st} = -289$ нТл.

10. Встановлено, що величина ПЕВ під час головної фази бурі зменшилася у порівнянні з контрольним днем удвічі поблизу полудня і у 2.5 раза — близько опівночі.

11. Зареєстровано під час головної фази бурі зменшення («провали») значень відносної концентрації іонів водню $N(H^+)/N$ на фіксованих висотах в 1.5...3.5 рази у порівнянні з контрольним днем. Найімовірніше, вони свідчили про зсув провалу легких іонів до екватора і спустошення магнітної силової трубки, що проходить над Харковом.

12. Встановлено, що у періоди негативних іоносферних збурень абсолютна амплітуда ХЗ концентрації електронів зменшувалася в 2...10 разів. Відносна амплітуда при цьому змінювалася незначно.

13. Відгуки хвильової активності на іоносферній бурі 8 і 10 листопада тривали приблизно добу і не менше трьох діб відповідно.

14. Показано, що максимальні значення абсолютних і відносних амплітуд мали місце на висотах 200...270 км.

15. Знайдено, що в денний час відносна амплітуда ХЗ концентрації електронів зазвичай становила 0.05...0.10. У нічний час вона дорівнювала 0.1...0.2, часто сягала значень 0.25...0.30, а іноді і 0.4...0.5.

11. СТАТИСТИКА І КЛАСИФІКАЦІЯ БУР. ІОНОСФЕРНИЙ ІНДЕКС

В роботі [209] досліджувались статистичні властивості ІБ за два цикли СА (з 1985 по 2005 рр.). Всі бурі було розділено на п'ять типів: Р-бурі (позитивні); N-бурі (негативні); двофазні РN-бурі (спочатку позитивна, а потім негативна фаза); НР-бурі (спочатку негативна, а потім позитивна фаза); NS-буря (незначна). Для аналізу було вибрано дві станції в США і Японії відповідно: Боулдер (Boulder, 40° пн. ш., 105.3° зх. д., магнітна широта — 47.4° пн. ш.) і Кокубунджі (Kokubunji, 35.7° пн. ш., 139.5° сх. д., магнітна широта — 26.8° пн. ш.).

Результати спостережень наведені в табл. 6 і 7. Видно, що кількість Р-бур становила приблизно

25 і 50 %, а N-бур — 45 і 20 % для станцій Boulder і Kokubunji відповідно. Для цих же станцій кількість PN-бур становила близько 11 і 12 %, NP-бур — 3.5 і 2.3 %. Кількість незначних бур не перевищувала 14 і 18 % відповідно для станцій Boulder і Kokubunji. Поява ІБ різних типів істотно залежала від часу доби.

Важливим результатом роботи [209] є те, що інтенсивність ІБ визначається не стільки інтенсивністю МБ, скільки причинами, які обговорювалися в розділах 8 і 9. Додамо, що, незважаючи на значні успіхи у вивченні ІБ, механізми виникнення ПІБ до кінця не зрозумілі [183].

В основу класифікації ІБ автором було покладено величину зменшення концентрації електронів під час негативних ІБ, яке досягає 10 разів. Позитивні ІБ характеризуються порівняно невеликим (приблизно до трьох разів) збільшенням N .

Для кількісної характеристики негативних іоносферних бур (НІБ) (negative ionospheric storms, NIS), доцільно ввести іоносферний індекс

$$I_{NIS} = 10 \lg \frac{N_{m0}}{N_{mmin}}, \quad (5)$$

де N_{m0} і N_{mmin} — незбурені і збурені значення N у максимумі шару F2. Характеристики НІБ наведено в табл. 8.

Таблиця 6. Статистика іоносферних бур для станції Boulder, що супроводжували магнітні бурі з $D_{st\ min} < -50$ нТл (LT — місцевий час) [203]

Тип бурі	05...12 LT	13...20 LT	21...04 LT	Загальна кількість
<i>P</i>	62	28	33	123
<i>PN</i>	28	19	5	52
<i>N</i>	48	96	80	224
<i>NP</i>	3	5	9	17
<i>NS</i>	24	23	22	69
Загальна кількість	165	170	150	485

Таблиця 7. Статистика іоносферних бур для станції Kokubunji, що супроводжували МБ з $D_{st\ min} < -50$ нТл (LT — місцевий час) [203]

Тип бурі	05...12 LT	13...20 LT	21...04 LT	Загальна кількість
<i>P</i>	100	57	98	255
<i>PN</i>	28	26	8	62
<i>N</i>	33	34	36	103
<i>NP</i>	5	1	6	12
<i>NS</i>	35	26	31	92
Загальна кількість	203	143	178	524

Таблиця 8. Класифікація негативних іоносферних збурень і їхні основні параметри

Тип ІБ	Назва НІБ (збурення)	N_{m0}/N_{mmin}	I_{NIS} , дБ	T_e/T_{e0}	T_i/T_{i0}	Тривалість ІБ, год	Кількість ІБ в циклі СА
NIS5	Вкрай сильна (Extreme)	> 10	> 10	3...4	2...2.5	70...100	2...4
NIS4	Дуже сильна (Severe)	4...10	6...10	2...3	1.5...2	50...70	50...150
NIS3	Сильна (Strong)	2...4	3...6	1.5...2	1.3...1.5	30...50	150...300
NIS2	Помірна (Moderate)	1.4...2	1.5...3.0	1.2...1.5	1.1...1.3	20...30	400...800
NIS1	Слабке збурення (Minor)	1...1.4	0...1.5	1...1.2	1...1.1	5...20	1000...2000

Таблиця 9. Характеристики позитивних іоносферних бур в F- і E-областях іоносфери

Тип ПІБ	Назва ПІБ	Ефекти ПІБ	Індекс ПІБ, дБ	Кількість ПІБ в циклі СА
PIS 5	Вкрай сильна (Extreme)	Збільшення до 2...3 разів ПЕВ, збільшення частотної ємності декаметрового каналу радіозв'язку, збільшення в 1.5...2 рази коефіцієнта поглинання гектометрових, декаметрових, метрових радіохвиль	>4.8	1...3
PIS 4	Дуже сильна (Severe)	Збільшення до 1.5...2 разів ПЕВ, частотної ємності декаметрового каналу радіозв'язку, збільшення в 1.3...1.5 рази коефіцієнта поглинання гектометрових, декаметрових, метрових радіохвиль	>4.0	~100
PIS 3	Сильна (Strong)	Збільшення до 1.4...1.5 рази ПЕВ, частотної ємності декаметрового каналу радіозв'язку, збільшення в 1.2...1.3 рази коефіцієнта поглинання гектометрових, декаметрових, метрових радіохвиль	>3.2	~200
PIS 2	Помірна (Moderate)	Збільшення до 1.3...1.4 рази ПЕВ, частотної ємності декаметрового каналу радіозв'язку, збільшення в 1.1...1.2 рази коефіцієнта поглинання гектометрових, декаметрових, метрових радіохвиль	>2.3	~600
PIS 1	Слабка (Minor)	Збільшення на десятки відсотків ПЕВ, частотної ємності декаметрового каналу радіозв'язку, коефіцієнта поглинання гектометрових і метрових радіохвиль	>1.0	1000...2000

Таблиця 10. Характеристики позитивних іоносферних бур в D-області іоносфери

Тип ПІБ	Назва ПІБ	Ефекти ПІБ	Індекс ПІБ, дБ	Кількість ПІБ в циклі СА
PIS 5	Вкрай сильна (Extreme)	Настає явище типу «блекаут», руйнування іоносферних радіоліній, повне поглинання радіохвиль кілометрового, гектометрового, декаметрового і частково метрового діапазонів, фазові аномалії міріаметрових і довших радіохвиль	>25	1...3
PIS 4	Дуже сильна (Severe)	Те ж	>20	~100
PIS 3	Сильна (Strong)	Порушення функціонування іоносферних радіоліній, збільшення поглинання радіохвиль кілометрового, гектометрового, декаметрового і метрового діапазонів, фазові спотворення міріаметрових і довших радіохвиль	>15	~200
PIS 2	Помірна (Moderate)	Те ж	>10	~600
PIS 1	Слабка (Minor)	Незначні порушення функціонування іоносферних радіоліній, збільшення поглинання радіохвиль кілометрового, гектометрового, декаметрового і метрового діапазонів, фазові спотворення міріаметрових і довших радіохвиль	>5	~1000
PIS 0	Вкрай слабка (Extreme minor)	Слабкий вплив на функціонування іоносферних радіоліній, збільшення поглинання радіохвиль кілометрового, гектометрового, декаметрового і метрового діапазонів, незначні фазові спотворення міріаметрових і довших радіохвиль	>1	2000...3000

Перейдемо тепер до класифікації позитивних іоносферних бур (ПІБ), (positive ionospheric storms, PIS). Під час ПІБ концентрація електронів N_{\max} в F-області іоносфери може збільшуватися приблизно до трьох разів [91].

За аналогією з виразом (5) введемо індекс ПІБ

$$I_{PIS} = 10 \lg \frac{N_{\max}}{N_0}. \quad (6)$$

Характеристики ПІБ наведено у табл. 9.

Основні ефекти ГБ у нижній іоносфері описано у книзі [91], а також в ряді інших робіт [75]. Під час ГБ в D-області іоносфери спостерігається збільшення концентрації електронів, яке визначається часовими і просторовими особливостями висипань високоенергійних ($E_e \sim 10 \dots 100$ кеВ) електронів або протонів ($E_p \sim 10 \dots 100$ МеВ). Важливо, що висипання електронів (з внутрішнього радіаційного поясу) відбуваються в середніх широтах, де параметр Мак-Ілвейна $L \approx 2$ [75, 207, 212]. Фонове значення щільності потоку електронів $\Pi_e \approx 10^5 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ [75]. Під час ГБ $\Pi_e \approx 10^8 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ [75]. При таких значеннях Π_e концентрація електронів в D-області іоносфери збільшується на 1-2 порядки в денний час і на 1-3 порядки в нічний час.

Автором [75] дана класифікація МБ, заснована на проявах бур в D-області іоносфери, що визначаються популяціями високоенергійних електронів. Виділено три типи: МБ1, МБ2 і МБ3. Відносна частота прояву таких бур близька до 50, 30 і 20 % відповідно. Важливо, що інтенсивність ІБ в D-області іоносфери залежить не від сили МБ (значень $D_{st\min}$), а від популяції електронів в радіаційному поясі.

За рахунок висипання частинок концентрація електронів в E-області іоносфери може збільшуватися до порядку вночі, а вдень — не більше ніж на 10 %. Збільшення N в D- і E-областях також можна віднести до ефектів ПІБ. Для опису

збільшення N в D- і E-областях іоносфери також можна скористатися індексом, який дається співвідношенням (6). При цьому в D-області іоносфери I_{PIS} змінюється приблизно від 1 до 25 і більше (табл. 10). В E-області іоносфери зазвичай $I_{PIS} \leq 3 \dots 5$.

12. СТАТИСТИКА МАГНІТНИХ БУР

Як відомо, зі збільшенням K_p кількість МБ n_{ms} швидко зменшується. Автором були побудовані кореляційні поля « $n_{ms} - K_p$ », « $n_{ms} - |D_{st}|$ » і отримано регресійну залежність для $K_p = 4 \dots 8$ і $K_p > 8$. При $K_p = 4 \dots 8$ пропонується апроксимація

$$\lg n_{ms} = -0.4 (K_p - 4) + 3.6. \quad (7)$$

При $K_p > 8$ швидкість зменшення n_{ms} збільшується, але при цьому різко зменшується і кількість МБ, а значить і їхня статистика (масив даних). Протягом циклу СА при $K_p = 9$ кількість $n_{ms} = 2 \dots 4$. При $K_p \geq 9$ пропонується така залежність n_{ms} від K_p :

$$\lg n_{ms} = -a(K_p - 8) + 2, \quad (8)$$

де $a = 1.5 \pm 0.2$. Якщо $a = 1.5$, то, як впливає з (8), середній інтервал часу ΔT між МБ з K_p , що дорівнює 10, становить близько 110 років. При $K_p = 11$ прогнозоване значення $\Delta T \approx 3500$ років.

Отримаємо регресійну залежність кількості n МБ за цикл СА від мінімального значення D_{st} -індексу. За вихідні візьмемо результати спостережень протягом семи циклів СА, виконаних в роботі [213]. Результати спостережень зведено в табл. 11.

Для $|D_{st}| = 50 \dots 520$ нТл автором пропонується така регресійна залежність:

$$\lg n_{ms} = -2.671 \lg |D_{st}| + 7.27, \quad (9)$$

а для $|D_{st}| = 520 \dots 2600$ нТл —

$$\lg n_{ms} = -3.45 \lg |D_{st}| + 9.38. \quad (10)$$

Зі співвідношень (9) і (10) впливає, що при $D_{st} = 360 \dots 680$ нТл спостерігається злам у регре-

Таблиця 11. Залежність числа магнітних бур за цикл СА від мінімального значення D_{st} -індексу

$ D_{st} $, нТл	50...100	101...150	151...200	201...300	361...680	681...1300*	>1300*
n_{ms}	181	52	19	8.4	1	0.1	0.01

*Зірочкою позначено результат екстраполяції згідно з регресійною залежністю (10)

сійній залежності. Цьому значенню D_{st} -індексу відповідає $K_p \approx 8$. Саме при $K_p \approx 8$ відбувається злам також у регресійній залежності $n_{ms}(K_p)$ (див. вирази (7) і (8)).

Викликає певний інтерес класифікація іоносферних збурень, наведена в роботі [8]. У цій роботі введено індекс іоносферної активності.

13. КЛАСИФІКАЦІЯ МАГНІТНИХ БУР

Класифікація МБ проводиться за їхньою інтенсивністю, характером і величиною відносних збурень параметрів середовища. У табл. 12 наведено класифікацію МБ за K_p - і D_{st}^* -індекси, запропоновану в роботах [87, 91–94, 98, 101, 102, 105], за рівнем геомагнітної активності і значеннями енергетичних параметрів. Магнітним бурям відповідають значення $K_p \geq 3$ і $|D_{st}^*| \geq 10 \dots 20$ нТл. Індокси $K_p < 2$ і $|D_{st}^*| < 5 \dots 10$ нТл відповідають магнітним збуренням.

У табл. 13 дана характеристика МБ за класифікацією NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Space Weather Scales (див. [http://www.sec.noaa.gov]). Її введено з метою оповіщення громадськості про стан космічної погоди і її вплив на людей і технологічні системи. Кожному типу МБ присвоюється рівень, як для ураганів, торнадо, землетрусів. Розглядаються впливи МБ на енергетичні системи, космічні апарати

та інші системи. У класифікації також вказується, як часто трапляються МБ за 11-річний цикл сонячної активності (СА). Табл. 13 доповнено автором для можливих значень $K_p = 10$ та 11 (табл. 14).

Магнітні бурі можна також класифікувати за величиною індексу D_{st}^{*min} (табл. 12) (див. також [87, 91–93, 105]). Певним значенням D_{st}^* -індексу відповідають значення K_p -індексу, що змінюється від 0 до 11. На відміну від класифікації NOAA (табл. 13), у табл. 12 містяться дані при $K_p < 5$ і $K_p > 9$. Головна відмінність полягає в тому, що класифікація за індексом дозволяє вказати енергію і потужність магнітних бур. Така класифікація краща для космічної геофізики. Класифікація NOAA зручна для споживачів відомостей про стан космічної погоди.

Заслужує також на увагу класифікація МБ, описана в роботі [167], де досліджуються статистичні властивості МБ.

14. КЛАСИФІКАЦІЯ ГЕОКОСМІЧНИХ БУР

Запропоновану автором класифікацію геокоосмічних бур доцільно проводити за величиною енергії, переданої сонячним вітром магнітосфері за одиницю часу. Мірою цієї енергії служить функція Акасофу ϵ_A (див. підрозділ 8.3.2).

Таблиця 12. Зразкові характеристики магнітних збурень і класифікація магнітних бур

K_p	$ D_{st}^* $, нТл	Δt , год	E_{ms} , 10^{14} Дж	P_m , 10^{10} Вт	Якісна характеристика збурення/бурі
0	< 3	1	< 1.2	< 3.3	Вкрай слабе збурення
1	3...5	1...2	1.2...2	1.7...5.6	Надслабе збурення
2	5.1...10	2...3	2...4	1.9...5.6	Дуже слабе збурення
3	10.1...20	3...5	4...8	2.2...7.4	Слабка буря
4	20.1...40	4...6	8...160	3.7...11.1	Вельми помірна буря
5	40.1...70	5...7	13...28	6.3...15.6	Помірна буря
6	70.1...120	6...8	28...48	9.7...22.2	Сильна буря
7	121...200	7...9	48...80	15...32	Дуже сильна буря
8	201...300	8...10	80...120	22...42	Надсильна буря
9	301...500	10...12	120...200	28...56	Вкрай сильна буря
10	501...1000	10...12	200...400	46...110	Винятково сильна буря
11	1001...2000	10...12	400...800	93...220	Екстремальна буря

Примітка. D_{st}^* — скориговане значення D_{st} -індексу, Δt — середня тривалість головної фази МБ, E_{ms} — збурення енергії геомагнітного поля, P_m — середня потужність МБ. МБ відповідають $K_p \geq 3$. Значення $K_p = 10 \dots 11$ очікуються один раз в кілька сотень-тисяч років.

Таблиця 13. Класифікація NOAA магнітних бур за K_p -індексом

Тип МБ	Назва МБ	Ефекти МБ (короткий опис впливу МБ на системи життєзабезпечення людей)	Індекс K_p	Кількість МБ в циклі СА (їхня тривалість)
G5	Вкрай сильна (Extreme)	Вихід з ладу ліній електропередач, порушення траєкторії КА, збої в роботі систем радіозв'язку, супутникової навігації, зміщення екваторіальної межі полярного сьйва до геомагнітної широти $\Phi = 40^\circ$	$K_p = 9$	4 (4 дні)
G4	Дуже сильна (Severe)	Вихід з ладу систем контролю і захисту енергетичних мереж, порушення траєкторії і орієнтації КА, збої в роботі систем радіозв'язку, супутникової навігації, зміщення екваторіальної межі полярного сьйва до $\Phi = 45^\circ$	$K_p = 8$, включно з 9–	100 (60 днів)
G3	Сильна (Strong)	Порушення в роботі пристроїв захисту і сигналізації енергетичних систем, додаткове гальмування низькоорбітальних КА, збої в роботі систем радіозв'язку і навігації, ймовірність спостереження полярного сьйва до $\Phi = 50^\circ$	$K_p = 7$	200 (130 днів)
G2	Помірна (Moderate)	Збої в роботі високоширотних енергетичних систем, необхідність корекції орбіти КА через додаткове гальмування, завмирання високочастотних радіосигналів у високих широтах, ймовірність спостереження полярного сьйва до $\Phi = 55^\circ$	$K_p = 6$	600 (360 днів)
G1	Слабка (Minor)	Невеликі порушення в роботі електричних мереж, слабкий вплив на системи КА, вплив МБ цього рівня і більш високих рівнів на поведінку мігруючих тварин, ймовірність спостереження полярного сьйва у високих широтах	$K_p = 5$	1700 (900 днів)

Примітка. КА — космічний апарат.

Таблиця 14. Доповнена автором класифікація за K_p -індексом

Тип МБ	Назва МБ	Ймовірні ефекти МБ	Індекс K_p	Ймовірний інтервал між МБ (їхня тривалість)
G7	Екстремальна	Вихід з ладу майже всіх ліній електропередач, аварії на КА, порушення їхніх траєкторій, майже повне припинення радіозв'язку і супутникової радіонавігації, зміщення межі полярних сьйв практично до геомагнітного екватора	$K_p = 11$	~1000 років (кілька діб)
G6	Винятково сильна	Вихід з ладу багатьох ліній електропередач, збої у функціонуванні та порушення траєкторій КА, збої в роботі більшості систем радіозв'язку і супутникової радіонавігації, зміщення межі полярних сьйв до геомагнітної широти $\Phi = 25...35^\circ$	$K_p = 10$	100...200 років (1...2 доби)

Таблиця 15. Класифікація геокосмічних бур і їхні основні параметри

Тип ГБ	Назва ГБ	ϵ_{Amax} , ГВт	G_{sr} , дБ	Тривалість, ч	Кількість ГБ в циклі СА
GSSI5	Вкрай сильна (Extreme)	1200	18	20...25	2...4
GSSI4	Дуже сильна (Severe)	600	15	15...20	50...150
GSSI3	Сильна (Strong)	300	12	9...15	150...300
GSSI2	Помірна (Moderate)	100	7	6...9	400...800
GSSI1	Слабка (Minor)	20	0	3...6	1000...2000

Введемо до розгляду індекс ГБ

$$G_{st} = 10 \lg \frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_{Amin}},$$

де $\varepsilon_{Amin} = 20$ ГВт — порогове значення функції Акасофу (при якому збурення в геокосмосі може вважатися ГБ). Тип ГБ будемо позначати GSSI1, GSSI2 і т. д. (GSSI — Geospace Storm Index). Характеристики ГБ наведено у табл. 15. Видно, що слабкій бурі відповідає значення $G_{st} = 0$, а вкрай сильній — 21 дБ.

15. ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОКОСМІЧНИХ БУР

Від успішності детального вивчення, моделювання і прогнозування ГБ залежить майбутнє нашої цивілізації, ефективність функціонування її технологічних систем космічного, повітряного і наземного базування. Без сумніву, інтенсивність всебічного вивчення, моделювання і прогнозування ГБ буде наростати в усіх розвинених країнах. Проблема ГБ — найважливіша проблема глобального характеру.

15.1. Супутникові засоби. Для дослідження сонячно-земних зв'язків використовувалися раніше і використовуються зараз ряд зарубіжних ШСЗ. Перерахуємо найважливіші з них: STEREO (Solar-Terrestrial Relations Observatory); ATS (Applications Technology Satellite); GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite); IMP-8 (Interplanetary Monitoring Platform); ISEE-3 (International Sun-Earth Explorer); WIND; ACE (Advanced Composition Explorer); SOHO (Solar and Heliospheric Observatory); DSCOVR (Deep Space Climate Observatory).

15.2. Проєкт «Іоносат-Мікро». Проєкт полягає в систематичному вивченні динамічних процесів в іоносфері шляхом узгоджених супутникових і наземних спостережень, спрямованих на пошук взаємозв'язку іоносферних збурень з процесами на Сонці, у магнітосфері, атмосфері і внутрішніх оболонках Землі [51].

Це перший великий проєкт в галузі космічних досліджень, авторами і головними виконавцями якого виступають українські фахівці. Проєкт виконується за участю Польщі та Болгарії, що є кроком інтеграції в європейський простір. Проєкт передбачає реалізацію освітньої програми.

Інструментальний комплекс «Іоносат-Мікро» призначений для реєстрації динамічної структури нейтральних і заряджених складових космічного середовища, тонкої просторової структури іоносферних струмових систем і магнітного поля Землі, електромагнітних хвильових структур УНЧ-ВНЧ-ДНЧ-діапазону [51].

15.3. Наземний супровід проєкту «Іоносат-Мікро». Успішна і ефективна реалізація проєкту «Іоносат-Мікро» неможлива без узгодження космічних і наземних вимірювань, без спільного аналізу динамічних процесів в іоносфері в широкому діапазоні просторово-часових масштабів та висот (від 60 до 1000 км і більше). Справа в тому, що вимірювання на космічному апараті дають інформацію про параметри середовища у місці його розташування. Параметри ж динамічних процесів визначаються взаємодією всіх геооболонки (внутрішніх і зовнішніх). Для побудови цілісної картини динамічних процесів необхідна інформація про процеси в цих геооболонках, про особливості взаємодії останніх. Таку інформацію можуть дати наземні і дистанційні методи.

Вимірювання на борту космічного апарата і узгоджені наземні спостереження не просто доповнюють одне одного, вони дозволяють комплексно розв'язати поставлене завдання. З формальної точки зору іоносфера описується системою рівнянь з багатьма невідомими. Що більше параметрів середовища буде вимірюватися в ході наземно-космічного експерименту, то точнішим буде розв'язок.

У нашій країні є кілька обсерваторій, в яких тривалий час (з 1960—1970-х рр.) ведуться систематичні дослідження фізичних процесів в іоносфері і навколоремному космосі (геокосмосі). Історично так склалося, що в околиці м. Харків розмістилися чотири обсерваторії, що належать Харківському національному університету (ХНУ) імені В. Н. Каразіна, Інституту іоносфери МОН і НАН України, Радіоастрономічному інституту НАН України та Інституту радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова.

Для наземного супроводу передбачається використовувати й інші засоби, розміщені в обсерваторіях, що належать Інститутам НАН України та університетам МОН України.

16. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Дослідження фізичних ефектів геокоосмічних бур відноситься до найважливіших наукових напрямів в космічній геофізиці.

2. Проблема взаємодії підсистем в системі Сонце — міжпланетне середовище — магнітосфера — іоносфера — атмосфера — Земля (СМСМІАЗ) протягом геокоосмічної бурі є міждисциплінарною. Вона може бути розв'язана з залученням системного підходу. Проблема носить багатофакторний характер. Реакція підсистем визначається синергетичним впливом цілої низки збурювальних факторів. Рішення проблеми ускладнюється тим, що система СМСМІАЗ належать до відкритих, нелінійних і нестаціонарних систем. У ній виявлено прямі і зворотні, позитивні і негативні зв'язки.

3. З огляду на багатогранність проявів геокоосмічних бур, через відносну індивідуальність і унікальність кожної бурі вивчення фізичних ефектів геокоосмічних бур далеке від завершення.

4. Поряд із всебічним дослідженням фізичних ефектів геокоосмічних бур необхідне їхнє детальне і адекватне моделювання і прогнозування. Вирішення цих завдань буде сприяти виживанню і сталому розвитку земної цивілізації, яка опановує все більш досконалі і складні техноло-

гії. Досвід останніх десятиліть показує: що більшими будуть технологічні досягнення землян, то вразливішою буде їхня інфраструктура до впливів сонячних і геокоосмічних бур.

5. Запропоновано класифікацію геокоосмічних бур за величиною функції Акасофу. Введено шість типів і запропоновано індекс геокоосмічної бурі.

6. Запропоновано класифікацію іоносферних збурень і збурень за величиною зміни концентрації електронів у максимумі шару F2. Введено п'ять типів геокоосмічних бур. Запропоновано іоносферний індекс, що описує інтенсивність негативних і позитивних іоносферних збурень.

7. Запропоновано класифікацію іоносферних збурень і збурень за величиною зміни концентрації електронів у нижній іоносфері. Введено шість типів позитивних іоносферних бур (ПІБ). Запропоновано відповідний іоносферний індекс.

8. Встановлено фізичну схему розвитку кожної групи іоносферних збурень і збурень. Показано тісний взаємозв'язок магнітної, іоносферної, атмосферної і електричної бур. Продемонстровано, що магнітну, іоносферну, атмосферну і електричну бурі слід розглядати як прояви єдиного складного і багатогранного процесу, названого геокоосмічною бурею.

ЛІТЕРАТУРА

1. Авакян С. В., Воронин Н. А., Дубаренко К. А. Влияние магнитных бурь на аварийность систем электроэнергетики, автоматики и связи. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. 2012. **3**, № 2. С. 253—265.
2. Авакян С. В. Физика солнечно-земных связей: некоторые результаты, проблемы и новые подходы. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. **48**, № 4. С. 435—442.
3. Авдюшин С. И., Данилов А. Д. Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (обзор). *Геомагнетизм и аэрономия*. 2000. **40**, № 5. С. 3—14.
4. Акасофу С.-И., Чепмен С. *Солнечно-земная физика*. Москва: Мир, 1974. Ч. 1. 384 с.
5. Акасофу С.-И., Чепмен С. *Солнечно-земная физика*. Москва: Мир, 1975. Ч. 2. 512 с.
6. Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Первалова Н. П., Ратовский К. Г. Крупномасштабные возмущения аврорального происхождения во время магнитных бурь 29—31 октября 2003 г. и 7—11 ноября 2004 г. по данным сети GPS и ионозондов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. **46**, № 5. С. 637—642.
7. Афраймович Э. Л., Косоголов Е. А., Леонович Л. А., Пирог О. М. Глобальная картина крупномасштабных ионосферных возмущений во время магнитной бури 25 сентября 1998 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2002. **42**, № 4. С. 491—498.
8. Бархатов Н. А., Бархатова О. М. Выявление классов ионосферной возмущенности по многолетним данным и критической частоте слоя F2. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2012. **52**, № 4. С. 510—518.
9. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Вяхирев В. Д., Гришкевич Л. В. Ночная ионизация D-области ионосферы умеренных широт у период магнитной бури. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1980. **20**, № 3. С. 547—548.

10. Бреус Т. К., Баевский Р. М., Фунтова И. И., Никулина Г. А., Алексеев Е. В., Черникова А. Г. Влияние возмущений геомагнитного поля на реакцию адаптивного стресса у космонавтов. *Космич. исслед.* 2008. **46**, № 4. С. 378—383.
11. Бреус Т. К., Халберг Ф., Корнелиссен Ж. Влияние солнечной активности на физиологические ритмы биологических систем. *Биофизика*. 1995. **40**, вып. 4. С. 737—749.
12. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. *Физика ионосферы*. Москва: Наука, 1988. 528 с.
13. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых процессов в ионосфере при различных состояниях космической погоды. *Космічна наука і технологія*. 2005. **11**, № 1/2. С. 37—57.
14. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. **46**, № 2. С. 193—208.
15. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. **46**, № 2. С. 209—218.
16. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2005. № 3. С. 4—35.
17. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Волновая активность в ионосфере в течение магнитосферной бури 7—10 ноября 2004 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. **51**, № 3. С. 309—324.
18. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере у период весеннего равноденствия 2006 г. *Космічна наука і технологія*. 2008. **14**, № 4. С. 82—91.
19. Витинский Ю. И. *Солнечная активность*. Москва: Наука, 1983. 193 с.
20. Владимирский Б. М., Темурьянц Н. А. *Влияние солнечной активности на биосферу-ноосферу*. Москва: МНЭПУ, 2000. 374 с.
21. Владимирский Б. М., Темурьянц Н. А., Мартынюк В. С. *Космическая погода и наша жизнь*. Фрязино: Век 2, 2004. 224 с.
22. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С., Поднос В. А., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений. *Вестн. Харьков. ун-та. Радиофизика и электроника*. 1999. № 427. С. 3—22.
23. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере. *Вестн. Харьков. ун-та. Радиофизика и электроника*. 1998. № 405. С. 157—177.
24. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1. *3Р. Успехи современной радиоэлектроники*. 1999. № 7. С. 3—15.
25. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 2. *3Р. Успехи современной радиоэлектроники*. 1999. № 8. С. 3—19.
26. Герман Дж. Р., Голдберг Р. А. *Солнце, погода и климат*. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 319 с.
27. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь. *Космічна наука і технологія*. 2005. **11**, № 5/6. С. 12—21.
28. Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. *Сейсмо-электромагнитные явления*. Москва: Наука, 1988. 174 с.
29. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. *Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу*. Москва: Наука, 2008. 295 с.
30. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. 1. Результаты наблюдений. *Космічна наука і технологія*. 2007. **13**, № 4. С. 62—76.
31. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждение. *Космічна наука і технологія*. 2007. **13**, № 4. С. 77—90.
32. Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие вспышку на солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2003. **43**, № 6. С. 770—787.
33. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Ионосферные возмущения в течение сильнейшей магнитной бури 7—10 ноября 2004 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. **47**, № 6. С. 761—779.
34. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1. *Космічна наука і технологія*. 2007. **13**, № 5. С. 58—76.

35. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2. *Космічна наука і технологія*. 2007. **13**, № 5. С. 77—96.
36. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности ионосферной бури 20—23 марта 2003 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. **45**, № 6. С. 789—802.
37. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2003. № 9. С. 57—94.
38. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф., Черняев С. В. Динамические процессы в ионосфере во время сильнейшей магнитной бури 30—31 мая 2003 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. **45**, № 6. С. 803—823.
39. Данилов А. Д., Казимировский Э. С., Вергасова Г. В., Хачикян Г. Я. *Метеорологические эффекты в ионосфере*. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 269 с.
40. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор). *Геомагнетизм и аэрономия*. 1985. **25**, № 5. С. 705—721.
41. Домнин И. Ф., Котов Д. В., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Исследование физических процессов в геокосмосе над Украиной при помощи радара некогерентного рассеяния. *Перспективы космических исследований Украины*. Киев: Академперіодика, 2011. С. 62—74.
42. Дружинин И. П., Хамьянова Н. Р. *Солнечная активность и переломы хода природных процессов на Земле*. Москва: Наука, 1969. 224 с.
43. Дубров А. П. *Геомагнитное поле и жизнь*. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 176 с.
44. Ермолаев Ю. И., Зеленый Л. М., Застенкер Г. Н., Петрукович А. А., Ермолаев М. Ю., Николаева Н. С., Панасюк М. И., Кузнецов С. Н., Мягкова И. Н., Муравьева Е. А., Юшков Б. Ю., Веселовский И. С., Дмитриев А. В., Жуков А. Н., Яковчук О. С., Кузнецов В. Д., Черток И. М., Ишков В. Н., Белов А. В., Ерошенко Е. А., Янке В. Г., Гайдаш С. П., Канонида Х. Д., Кузин С. В., Житник И. А., Игнатъев А. П., Слемзин В. А., Суходрев Н. К., Шестов С. А., Еселевич М. В., Еселевич В. Г., Руденко Г. В., Дворников В. М., Слобнов В. Е., Кравцова М. В., Богод В. М., Котельников В. С., Першаков Л. А., Белоглазов М. И., Власов В. И., Чашей И. В., Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Козлов В. И., Пархомов В. А., Кугаенко Ю. А., Хисамов Р. З., Янчуковский В. Л., Кудела К. Год спустя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. **45**, № 6. С. 723—763.
45. Заславский Г. М., Сагдеев Р. З. *Введение в нелинейную физику. От маятника до турбулентности и хаоса*. Москва: Наука, 1988. 368 с.
46. Кишук В. П., Марченко С. Г., Соколов С. Н. Эффекты крупномасштабного высыпания релятивистских магнитосферных электронов во время и после геомагнитной бури 27—28 ноября 1990 г. по данным распространения СДВ. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1993. **33**, № 4. С. 93—100.
47. Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Рожной А. А., Соловьева М. С. Вариации параметров СДВ-сигналов на радиотрассе Австралия — Камчатка во время магнитных бурь. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2004. **44**, № 3. С. 385—393.
48. Климонтович Ю. Л. Критерии относительной степени упорядоченности открытых систем. *Успехи физ. наук*. 1996. **166**, № 11. С. 1231—1243.
49. Козырева О. В., Клейменова Н. Г., Корнилова Т. А., Кауристи К., Маннинен Ю., Ранта А. Необычная пространственно-временная динамика геомагнитных возмущений в главную фазу сверхсильной магнитной бури 7—8 ноября 2004 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. **46**, № 5. С. 614—626.
50. Козырева О. В., Клейменова Н. Г., Шотт Ж. Ж. Геомагнитные пульсации начальной фазы магнитной бури. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2004. **44**, № 1. С. 37—46.
51. *Космический проект «Ионосат-Микро»*. Киев: Академперіодика, 2013. 218 с.
52. Кременецкий И. О., Черемних О. К. *Космічна погода: механізми і прояви*. За ред. О. П. Федорова. Київ: Наук. думка, 2009. 144 с.
53. Куркин В. И., Пирог О. М., Полех Н. М., Тащилин А. В., Шпынев Б. Г., Кручинина М. А., Смирнов В. Ф. *Комплексные исследования ионосферных эффектов геомагнитных бурь в северо-восточном регионе России*. Тр. XX Всероссийской конф. по распространению радиоволн (2—4 июля 2002 г. Нижний Новгород). Нижний Новгород, 2002. С. 62—63.
54. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. *Сверхширокополосные сигналы и процессы*: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. 576 с.
55. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. А. *Ионосферные предвестники землетрясений*. Москва: Наука, 1992. 304 с.
56. Масамуро Широ. *Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли*. Москва: Наука, 1971. 209 с.
57. Мизун Ю. Г. *Космос и здоровье*. Москва: ВЕЧЕ, АСТ, 1997. 608 с.
58. Мизун Ю. Г. *Космос и погода*. Москва: Наука, 1986. 144 с.

59. Мирошниченко Л. И. Проблема «Солнце—Земля»: современные концепции и физические механизмы. *Космічна наука і технологія*. 2011. **17**, № 1. С. 17—22.
60. Мирошниченко Л. И. *Солнечная активность и Земля*. Москва: Наука, 1981. 144 с.
61. Мирошниченко Л. И. *Физика Солнца и солнечно-земных связей*: учеб. пособие. Москва: Университетская книга, 2011. 174 с.
62. Моисеева Н. И., Сысуев В. М. *Временная среда и биологические ритмы*. Л.: Наука, 1981. 126 с.
63. Монин А. С., Шишков Ю. А. Климат как проблема физики. *Успехи физ. наук*. 2000. **170**, № 4. С. 419—445.
64. Мусатенко С. И. Радиоизлучение околоземного космического пространства как результат воздействия солнечных вспышек на магнитосферу и ионосферу Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1980. **20**, № 5. С. 884—888.
65. Остапенко А. А., Мальцев Ю. П. Связь потока электромагнитной энергии у высокоширотную ионосферу с параметрами солнечного ветра. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. **45**, № 2. С. 176—181.
66. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Проявления геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. в нижней ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. **47**, № 5. С. 646—658.
67. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований волновых возмущений в нижней ионосфере. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2005. № 7. С. 38—56.
68. Полех Н. М., Пирог О. М., Воейков С. В., Татаринцов П. В., Степанов А. Е., Бычков В. В., Думбрава Ф. Ионосферные возмущения у восточно-азиатском регионе во время геоактивного периода в ноябре 2004 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. **46**, № 5. С. 627—636.
69. Потапов А. А., Черногор Л. Ф. Физические процессы в нелинейной системе Космос — Земля: каналы воздействия на биосферу (человека). *Нелинейный мир*. 2010. **8**, № 6. С. 347—360.
70. *Проблемы гелиобиологии*. Новосибирск: Новосибирский гос. мед. институт, 1977. 102 с.
71. Пудовкин М. И., Распопов О. М. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры (обзор). *Геомагнетизм и аэрономия*. 1992. **32**, № 5. С. 1—22.
72. Пулинец С. А., Узун Д. П., Карелин А. В., Давиденко Д. В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера, инициируемых ионизацией. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. **55**, № 4. С. 540—558.
73. Рожной А. А., Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Соловьева М. С. Влияние неоднородностей солнечного ветра и ММП на параметры ДВ (40 кГц) сигналов на среднеширотной трассе. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. **45**, № 4. С. 459—466.
74. Сидякин В. Т., Темуриянц Н. А., Макеев В. Б., Владимирский Б. М. *Космическая экология*. Киев: Наук. думка, 1985. 176 с.
75. Соколов С. Н. Магнитные бури и их эффекты в нижней ионосфере. Различия бурь разных типов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. **51**, № 6. С. 757—768.
76. *Солнечно-земная физика*. Пер. с англ. под ред. И. А. Жулина, Г. А. Скуридина. Москва: Мир, 1968. 428 с.
77. *Солнечно-земные связи, погода и климат*. Под ред. Б. Мак-Кормака, Т. Селиги. Москва: Мир, 1982. 376 с.
78. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2001. **41**, № 5. С. 659—666.
79. Урядов В. И., Куркин В. И., Вертоградов В. Г., Понятов А. А., Пономарчук С. Н. Особенности распространения КВ сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2004. **47**, № 12. С. 1041—1056.
80. *Физика космоса. Маленькая энциклопедия*. Под ред. Р. А. Сюняева. Москва: Сов. энциклопедия, 1986. 784 с.
81. Хаснулин В. И. *Космические тайны вашего самочувствия*. Новосибирск: Наука, Сиб. от-ние, 1992. 176 с.
82. Черногор Л. Ф. Взрывы боеприпасов на военных базах — источник экологических катастроф в Украине. *Екологія і ресурси*. 2004. № 10. С. 55—67.
83. Черногор Л. Ф. Взрывы на газопроводах и аварии на газовых хранилищах — источник экологических катастроф в Украине. *Екологія і ресурси*. 2008. № 3. С. 56—72.
84. Черногор Л. Ф. *Воздействие вариаций космической и атмосферной погоды на биосферу: системный подход*. А. Л. Чижевский. Вклад в науку и культуру: Материалы I Международной научно-практической конференции, посвященной сохранению творческого наследия и развития идей А. Л. Чижевского. Изд-во АКФ «Политоп», 2017. С. 101—103.
85. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Магнито-ионосферные эффекты, сопровождавшие сильнейшую техногенную катастрофу. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. **58**, № 5. С. 700—712.
86. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина — средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах. *Космический проект «Ионосат-Микро»*. Киев: Академперіодика, 2013. С. 160—182.

87. Черногор Л. Ф. Геокосмосфера — открытая динамическая нелинейная система. *Вісник Харківського ун-ту. Радіофізика та електроніка*. 2002. 2, № 570. С. 175—180.
88. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и геоэкологические последствия массовых химических взрывов на военных складах в г. Артемовске. *Геофиз. журн.* 2004. 26, № 4. С. 31—44.
89. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов на военной базе вблизи г. Мелитополь. *Геофиз. журн.* 2004. 26, № 6. С. 61—73.
90. Черногор Л. Ф. Геоэкологические последствия взрыва склада боеприпасов. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2008. № 4. С. 359—369.
91. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. *Физика геокосмических бур*: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. 408 с.
92. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — геокосмос как открытая динамическая нелинейная система. *Космічна наука і технологія*. 2003. 9, № 5/6. С. 96—105.
93. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1. *Нелинейный мир*. 2006. 4, № 12. С. 655—697.
94. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2. *Нелинейный мир*. 2007. 5, № 4. С. 225—246.
95. Черногор Л. Ф. Каналы воздействия вариаций космических и атмосферных факторов на биосферу и человека. *Фізіологічний журн.* 2010. 56, № 3. С. 25—40.
96. Черногор Л. Ф. *Каналы воздействия космической и атмосферной погоды на человека*. А. Л. Чижевский. Вклад в науку и культуру. Материалы I Международной научно-практической конференции, посвященной сохранению творческого наследия и развития идей А. Л. Чижевского. Изд-во АКФ «Политоп», 2017. С. 104 — 107.
97. Черногор Л. Ф. *Нелинейная радиофизика*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2016. 208 с.
98. Черногор Л. Ф. *О нелинейности в природе и науке*. Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
99. Черногор Л. Ф. *Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет*. Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. 386 с.
100. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомагнетизм и астрономия*. 2008. 48, № 5. С. 681—702.
101. Черногор Л. Ф. Солнце — межпланетная среда — магнитосфера — ионосфера — атмосфера — Земля как открытая неравновесная нелинейная физическая система. 1. *Журн. проблем эволюции открытых систем*. 2011. 13, 1. С. 22—66.
102. Черногор Л. Ф. Солнце—межпланетная среда—магнитосфера—ионосфера—атмосфера—Земля как открытая неравновесная нелинейная физическая системы. 2. *Журн. проблемы эволюции открытых систем*. 2013, 15, 1. С. 43—87.
103. Черногор Л. Ф. Тропический циклон как элемент системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера. *Космічна наука і технологія*. 2006. 12, № 2/3. С. 16—26.
104. Черногор Л. Ф. Физика геокосмоса и космическая погода: системный подход, достижения, стратегия исследований. *Перспективы космических исследований Украины*. Киев: Академперіодика, 2011. С. 55—61.
105. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2003. 8, № 1. С. 59—106.
106. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*: монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 555 с.
107. Черногор Л. Ф. *Физика и экология системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера*. Науки про Землю та космос — суспільству. Праці Першої наукової конференції (Київ, 25—27 червня 2007 р.). Київ: НАНУ-НЦАДЗ ІГН, ГАО, 2007. С. 86—93.
108. Черногор Л. Ф. Физические процессы в околоземной среде, сопровождавшие военные действия в Ираке (март — апрель 2003 г.). *Космічна наука і технологія*. 2003. 9, № 2/3. С. 13—33.
109. Черногор Л. Ф. Экологические последствия массовых химических взрывов при техногенной катастрофе. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2006. № 6. С. 522—535.
110. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Попередження». *Космічна наука і технологія*. 1999. 5, № 1. С. 38—47.
111. Чибисов С. М. Биоритмы и гелиофизические факторы. *Фундаментальные исслед.* 2006. № 9. С. 34—41.
112. Чижевский А. Л. *Земное эхо солнечных бурь*. Москва: Мысль, 1976. 367 с.
113. Шустер Г. Г. *Детерминированный хаос: Введение*. Москва: Мир. 1988. 240 с.
114. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Занимонский Е. М., Лизунов Г. В., Лисаченко В. Н. Связь атмосферной и космической погодных систем. *Космічна наука і технологія*. 2008. 14, № 5. С. 6—36.
115. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н., Лизунов Г. В., Гровс К., Молдвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2004. 9, № 2. С. 130—151.

116. Albertson V. D., Thorson J. M. Power system disturbances during a K-8 geomagnetic storm: August 4, 1972. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1974. **PAS-93**. P. 1025–1030.
117. Bailey G. J., Moffett R. J., Murphy J. A. Calculated daily variations of O⁺ and H⁺ at mid-latitudes. II. Sunspot maximum results. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1979. **41**. P. 471–482.
118. Balan, N., Rao P. B. Dependence of ionospheric response on the local time of sudden commencement and intensity of storms. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1990. **52**. P. 269–275.
119. Banks P. M. Charged particle temperatures and electron thermal conductivity in the upper atmosphere. *Ann. Geophys.* 1966. **22**. P. 577–584.
120. Benestad R. E. *Solar activity and earth's climate*. Springer-Praxis, 2002. 287 p.
121. Bilitza D. International Reference Ionosphere-Status. *Adv. Space Res.* 1997. **20**, № 9. P. 1751–1754.
122. Bilitza D. Preface. *Adv. Space Res.* 1997. **20**, № 9. P. 1649.
123. Blanc M., Richmond A. D. The ionospheric disturbance dynamo. *J. Geophys. Res.* 1980. **85**. P. 1669–1686.
124. Bothmer V., Daglis I. *Space Weather: Physics and Effects*. New York: Springer-Verlag, 2006.
125. Bradley P. A., Cander L. R., Kutiev I., Hanbaba R. PRIME (COST 238) Studies of Ionospheric Storm Effects. *Adv. Space Res.* 1997. **20**, № 9. P. 1669–1678.
126. Breus T. K., Ozheredov V. A., Syutkina E. V., Rogoza A. N. Some aspects of the biological effects of Space Weather. *J. Atmos. and Sol-Terr Phys.* 2008. **70**, № 2-4. P. 436–441.
127. Buonsanto M. J. A case study of the ionospheric storm dusk effects. *J. Geophys. Res.* 1995. **100**, № A12. P. 23,857–23,869.
128. Buonsanto M. J., Codrescu M., Emery B. A., Fesen C. G., Fuller-Rowell T. J., Melendez-Alvira D. J., Sipler D. P. Recent Results of the CEDAR Storm Study. *Adv. Space Res.* 1997. **20**, № 9. P. 1655–1664.
129. Buonsanto M. J., Foster J. C., Sipler D. P. Observations From Millstone Hill During the Geomagnetic Disturbances of March and April 1990. *J. Geophys. Res.* 1992. **97**. P. 1225–1243.
130. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms—a Review. *Space Sci. Reviews*. 1999. **88**. P. 563–601.
131. Buonsanto M. J., González S. A., Pi X., Ruohoniemi J. M., Sulzer M. P., Swartz W. E., Thayer J. P., Yuan D. N. Radar Chain Study of the May, 1995 Storm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1999. **61**. P. 233–248.
132. Buonsanto M. J. Millstone Hill Incoherent Scatter F Region Observations During the Disturbances of June 1991. *J. Geophys. Res.* 1995. **100**, № A4. P. 5743–5755.
133. Burns A. G., Killeen T. L., Deng W., Carignan G. R., Roble R. G. Geomagnetic storm effects in the low- to middle-latitude upper thermosphere. *J. Geophys. Res.* 1995. **100**. P. 14673–14691.
134. Burns A. G., Killeen T. L., Roble R. G. A theoretical study of thermospheric composition perturbations during an impulsive geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.* 1991. **96**(A8). P. 14,153–14,167.
135. Carlowicz M. J., Lopez R. E. *Storms from the Sun*. Washington DC.: Joseph Henry Press, 2002.
136. Chernogor L. F., Blaunstein N. *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2013. 542 p.
137. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations. *Int. J. Geomagn. Aeron.* 2007. **7**. G13001. doi:10.1029/2005GI000125.
138. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth — Atmosphere — Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2008. **13**, № 2. P. 120–137.
139. Chernogor L. F. The Earth — atmosphere — geospace system: main properties and processes. *Int. J. Rem. Sens.* 2011. **32**, № 11. P. 3199–3218.
140. Danilov A. D., Lastovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *Int. J. Geomagn. Aeron.* 2001. **2**, № 3. P. 209–224.
141. *Encyclopedia of Nonlinear Science* (Ed. Alwyn Scott). New York and London: Routledge. 2006. P. XLIV, 1062.
142. Essex E. A., Mendillo M., Schödel J. P., Klobuchar J. A., da Rosa A. V., Yeh K. C., Fritz R. B., Hibberd F. H., Kersley L., Koster J. R., Matsoukas D. A., Nakata Y., Roelofs T. H. A global response of the total electron content of the ionosphere to the magnetic storms of 17 December and 18 June 1972. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1981. **43**. P. 293–306.
143. Field P. R., Rishbeth H. The response of ionospheric F2-layer to geomagnetic activity: an analysis of worldwide data. *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* 1997. **59**, № 2. P. 163–180.
144. Foster J. C., Cummer S., Inan U. S. Midlatitude particle and electric field effects at the onset of the November 1993 Geomagnetic Storm. *J. Geophys. Res.* 1998. **103**. P. 26,359–26,366.
145. Foster J. C., Rich F. J. Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1998. **103**. P. 26,367–26,372.
146. Foster J. C. Storm-time plasma transport at middle and high latitudes. *J. Geophys. Res.* 1993. **98**. P. 1675–1689.
147. Freeman J. W. *Storms in Space*. London, New York: Cambridge University Press, 2001.

148. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Moffett R. J., Quegan S. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1994. **99**. P. 3893—3914.
149. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Roble R. G., Richmond A. D. How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? Magnetic storms. (Eds Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K.). Washington, D.C. American Geophysical Union, 1998. *Geophysical monograph series*. **98**. P. 203—225.
150. Gonzales C. A., Kelley M. C., Behnke R. A., Vickrey J. F., Wand R., Holt J. On the Latitudinal Variations of the Ionospheric Electric Field During Magnetospheric Disturbances. *J. Geophys. Res.* 1983. **88**, № A11. P. 9135—9144.
151. Gonzales W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 1994. **99**, № A4. P. 5771—5792.
152. Goodman J. M. *Space Weather and Telecommunications*. Springer. 2005.
153. Horsthemke W., Lefever R. Noise-induced Transitions. Theory and Applications in Physics. Chemistry and Biology. Berlin-Tokyo: Springer-Verlag, 2006. 318 p.
154. *International Solar Terrestrial physics*. URL: <https://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/> (Last accessed: 17.09.2018).
155. Jacovchouk O. S., Mursula K., Hollappa L., Veselovsky I. S., Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932—2009. *J. Geophys. Res.* 2012. **117**. A03201. DOI: 10.1029/2011ja017093.
156. Jones K. L., Rishbeth H. The origin of storm increases of mid-latitude F-layer electron concentration. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1971. **33**. P. 391—401.
157. Kallenrode May-Britt. *Space Physics: An introduction to plasmas and particles in the heliosphere and magnetospheres*. New York: Springer, 2004. 482 p.
158. Kivelson M. G., Russell Ch. T. *Introduction to Space Physics*. Cambridge: Cambridge Atmospheric & Space Sci. Ser., 1995. 568 p.
159. Kleimenova N. G., Kozyreva O. V., Breus T. K., Rapoport S. I. Pc-1 geomagnetic pulsations as a potential hazard of myocardial infarction. *J. Atmos. and Sol-Terr Phys.* 2007. **69**. P. 1759—1764.
160. Knipp D. J., Crooker N., Engebretson M., Li X., McAllister A. H., Mukai T., Kokubun S., Reeves G. D., Obara T., Weatherwax A. N., Emery B. A. An Overview of the Early November 1993 Geomagnetic Storm. *J. Geophys. Res.* 1998. **103**. P. 26,197—26, 220.
161. Knipp D. J., Fraser B.J., Shea M. A., Smart D. F. On the Little-Known Consequences of the 4 August 1972 Ultra-Fast Coronal Mass Ejecta: Facts, Commentary, and Call to Action. *Space Weather*. 2018. **16**, № 11. P. 1635—1643.
162. Knipp D. J., Ramsay A. C., Beard E. D., Boright A. L., Cade W. B., Hewins I. M., McFadden R. H., Denig W. F., Kilcommons L. M., Shea M. A., Smart D. F. The May 1967 great storm and radio disruption event: Extreme space weather and extraordinary responses. *Space Weather*. 2016. **14**. P. 614— 633.
163. Lakhina G. S., Alex S., Tsurutani B. T., Gonzalez W. D. *Supermagnetic storms: Hazard to society*. (Eds A. S. Sharma, A. Bunde, V. P. Dimri, D. N. Baker). Extreme events and natural hazards: The complexity perspective. Washington, DC: American Geophysical Union, 2013. P. 267—278.
164. Lathuillère C., Menvielle M., Lilénsten J., Amari T., Radicella S. M. From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments. *Annales Geophysicae*. 2002. **20**, № 7. P. 1081—1104.
165. Lilénsten J., Bornarel J. *Space Weather. Environment and Societies*. Springer. ISBN 978-1-4020-4331-4.
166. Lin C. H., Richmond A. D., Heelis R. A., Bailey G. J., Lu G., Liu J. Y., Yeh H. C., Su S.-Y. Theoretical study of the low and mid latitude ionospheric electron density enhancement during the October 2003 storm: Relative importance of the neutral wind and the electric field. *J. Geophys. Res.* 2005. **110**, A12312. doi:10.1029/2005JA011304.
167. Loewe C. A., Prolss G. W. Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1997. **102**. P.14209—14213.
168. Lu G., Goncharenko L. P., Richmond A. D., Roble R. G., Aponte N. A dayside ionospheric positive storm phase driven by neutral winds. *J. Geophys. Res.* 2008. **113**, A08304. doi:10.1029/2007JA012895.
169. Mannucci A. J., Tsurutani B. T., Iijima B. A., Komjathy A., Saito A., Gonzalez W. D., Guarnieri F. L., Kozyra J. U., Skoug R. Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29—30, 2003 “Halloween storms”. *Geophys. Res. Lett.* 2005. **32**, L12S02. doi:10.1029/2004GL021467.
170. Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.* 1959. **64**. P. 305—321.
171. Matuura N. Theoretical models of ionospheric storms. *Space Sci. Rev.* 1972. **13**. P. 124—189.
172. Mayr H. G., Volland H. Magnetic storm characteristics of the thermosphere. *J. Geophys. Res.* 1983. **78**. P. 2251—2264.
173. Mendillo M., Narvaez C. Ionospheric storms at geophysically equivalent sites. Part 1: Local time patterns for sub-auroral ionospheres. *Ann. Geophys.* 2009. **27**. P. 1679—1694.
174. Mendillo M., Narvaez C. Ionospheric storms at geophysically equivalent sites. Part 2: Local time patterns for sub-auroral ionospheres. *Ann. Geophys.* 2010. **28**. P. 1449—1462.

175. Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.* 2006. **44**. RG4001. doi:10.1029/2005RG000193.
176. Mikhailov A. V., Förster M. Some F2-layer Effects During the January 06–11, 1997 CEDAR Storm Period as Observed with the Millstone Hill Incoherent Scatter Facility. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1999. **61**. P. 249–261.
177. Mikhailov A. V., Foster J. C. Daytime Thermosphere Above Millstone Hill During Severe Geomagnetic Storms. *J. Geophys. Res.* 1997. **102**. P. 17,275–17,282.
178. Mishin E., Foster J. C., Potekhin A. P. Ionospheric perturbations caused by quasi-periodic magnetic disturbances during the September 25, 1998 storm. *EOS Trans. AGU*. 2000. **81**, № 48. Fall Meeting. F 947. San Francisco. USA.
179. Mishin E., Foster J. C., Rich F. J., Taran V. I. Prompt ionospheric response to short period solar wind variations during the magnetic cloud event Sep 25, 1998. *EOS Trans. AGU*. 2001. **81**, N. 20. Spring Meeting. S 291. San Francisco. USA. May 15.
180. Moldwin M. *An introduction to space weather*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2008.
181. *National Space Weather Program*. URL: <http://www.spaceweathercenter.org/swop/NSWP/1.html> (Last accessed: 12.09.2018).
182. Ngwira C. M., McKinnell L.-A., Cilliers P. J. Ionospheric observations during the geomagnetic storm events on 24–27 July 2004: Long-duration positive storm effects. *J. Geophys. Res.* 2012. **117**, № A1. DOI: 10.1029/2011JA016990
183. Obayashi T. Morphology of Storms in the Ionosphere. *Rev. Geophys.* 1964. **1**. P. 335–366.
184. Pavlov A. V., Buonsanto M. J., Schlesier A. C., Richards P. G. Comparison of Models and Data at Millstone Hill During the 5–11 June 1991 Storm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1999. **61**. P. 263–279.
185. Pavlov A. V., Buonsanto M. J. Using steady-state vibrational temperatures to model effects of N_2^* on calculations of electron densities. *J. Geophys. Res.* 1996. **101**. P. 26,941–26,945.
186. Pavlov A. V. The role of vibrationally excited Oxygen and Nitrogen in the ionosphere during the undisturbed and geomagnetic storm period of 6–12 April 1990. *Ann. Geophys.* 1998. **16**. P. 589–601.
187. *Physics of the Space Environment* (Eds. Gombosi T. I., Houghton J. T., Dessler A. J.). Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 978-0-521-60768-1.
188. Pirog O.M., Polekh N.M., Voeykov S.V., Zherebtsov G.A., Tatarinov P.V. Ionospheric disturbances in the East-Asian region during geomagnetic storm in November, 2004. *Adv. in Space Res.* 2007. **39**. P. 1335–1341.
189. Prölss G. W. Ionospheric F region storms. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*. (Ed. H. Volland). Boca Raton, Fla: CRC Press, 1995. P. 195–248.
190. Prölss G. W., Jung M. J. Traveling atmospheric disturbances as a possible explanation for daytime positive storm effects of moderate duration at middle latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1978. **40**. P. 1351–1354.
191. Prölss G. W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere. (Eds. Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K.). Magnetic storms. Washington, D.C. American Geophysical Union, *Geophysical monograph series*. 1998. **98**. P. 249–290.
192. Prölss G. W. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects. *Ann. Geophys.* 1993. **11**. P. 1–9.
193. Pulinets S., Boyarchuk K. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin: Springer – Verlag, 2004. **13**. 315 p.
194. Rastogi R. G. Geomagnetic storms and electric fields in the equatorial ionosphere. *Nature*. 1977. **268**. P. 422–424.
195. Reddy C. A., Nishida A. Magnetospheric Substorms and Nighttime Height Changes of the F2 Region at Middle and Low Latitudes. *J. Geophys. Res.* 1992. **97**, № A3. P. 3039–3061.
196. Rees D. Observation and modeling of ionospheric and thermospheric disturbances during major geomagnetic storms: a review. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995. **57**, № 12. P. 1433–1457.
197. Reeves G. D., McAdams K. L., Friedel R. H. W., O'Brien T. P. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms. *Geophys. Res. Lett.* 2003. **30**, № 10. P. 36-1–36-4.
198. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., Sipler D. P. Ionospheric Effects of the March 1990 Magnetic Storm: Comparison of Theory and Measurement. *J. Geophys. Res.* 1994. **99**, № A12. P. 23,359–23,365.
199. Richmond A. D., Matsushita S. Thermospheric response to a magnetic substorm. *J. Geophys. Res.* 1975. **80**. P. 2839–2850.
200. Robinson R. M. *Book Review: Space Weather, Environment and Societies — Space Weather*, 4, S05004. 2006. 242 p. DOI:10.1029/2006SW000243.
201. Roble R. G., Dickinson R. E., Ridley E. C. Global circulation and temperature structures of thermosphere with high-latitude convection. *J. Geophys. Res.* 1982. **87**. P. 1599–1614.
202. Schunk R. W., Sojka J. J. Ionosphere-Thermosphere Space Weather Issues. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1996. **58**. P. 1527–1574.
203. Schwenn R. Space Weather, Living Reviews in Solar Physics 3. 2006. **2**. online article.
204. Schunk R. W., Nagy A. F. Electron temperature in the F region of the ionosphere: theory and observations. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1978. **16**, № 3. P. 355–399.
205. *Space Storms and Space Weather Hazards* (Ed. Daglis I. A.). New York: Springer-Verlag, 2001. ISBN 1-4020-0031-6.
206. *Space Weather (Geophysical Monograph)* (Ed. Song P., Singer H., Siscoe G.). Washington, D.C. 2001. ISBN 0-87590-984-1.

207. Tadokoro H.; Tsuchiya F.; Miyoshi Y.; Misawa H.; Morioka A., Evans D. S. Electron flux enhancement in the inner radiation belt during moderate magnetic storms. *Ann. Geophys.* 2007. **25**, № 6. P. 1359—1364.
208. Tsurutani T., Bruce E., Echer. E, Guarnieri F., Kozyra J. CAUSES November 7—8, 2004, superstorm: Complex solar and interplanetary features in the post-solar maximum phase. *Geophys. Res. Lett.* 2008. **35**. DOI: 10.1029/2007GL031473.
209. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu J. Y. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles. *J. Geophys. Res.* 2011. **116**, A11328. DOI: 10.1029/2011JA017042.
210. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Vaidyan V. K., Alleyne H., Bailey G. J. Response of the ionosphere to super storms. *Adv. Space Res.* 2007. **41**. P. 548—555. doi:/10.1016/j.asr.2007.08.029.
211. Willis D. M., Stevens P. R., Crothers S. R. Statistics of the largest geomagnetic storms per solar cycle (1844 — 1993). *Ann. Geophysicae.* 1997. **15**, № 6. P. 719 — 728.
212. Wratt D. S. Ionization enhancement in the middle latitude D region due to precipitating high energy electrons. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1976. **38**, № 5. P. 511—516.
213. Yakovchouk O. S., Mursula K., Holappa L., Veselovsky I. S., Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932—2009. *J. Geophys. Res.* 2012. **117**, № A3. DOI: 10.1029/2011JA017093.
214. Yermolaev Yu. I., Zelenyi L. M., Kuznetsov V. D., Chertok I. M., Panasyuk M. I., Myagkova I. N., Zhitnik I. A., Kuzin S. V., Eseevich V. G., Bogod V. M., Arkhangel'skaja I. V., Arkhangel'sky A. I., Kotov Yu. D. Magnetic storm of November, 2004: Solar, interplanetary, and magnetospheric disturbances. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.* 2008. **70**, № 2-4. P. 334—341.
215. Zalyubovsky I. I., Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The Earth — Atmosphere — Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena. *Space Research in Ukraine. 2006—2008. The Report Prepared by the Space Research Institute of NASU-NSAU.* Kyiv, 2008. P. 19—29.

Стаття надійшла до редакції 17.09.2018

REFERENCES

1. Avakyan S. V., Voronin N. A., Dubarenko K. A. (2012). Influence of magnetic storms on the accident rate of power generation, automation and communication systems. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti StPbGU. Nauka i obrazovaniie*, **3** (2), 253—265 [in Russian].
2. Avakyan S. V. (2008). Physics of the Solar — Terrestrial Coupling: Results, problems, and New Approaches. *Geomagnetism and Aeronomy*, **48** (4), 417—424.
3. Avdiushin S. I., Danilov A. D. (2000). The Sun, weather and climate: today's view on the problem (overview). *Geomagnetism and Aeronomy*, **40** (5), 3—14.
4. Akasofu S.-I., Chapman S. (1972). *Solar-Terrestrial Physics*. Oxford U.P., London.
5. Akasofu S.-I., Chapman S. (1972). *Solar-Terrestrial Physics*. Oxford U.P., London.
6. Afraimovich E. L., Voeykov S. V., Perevalova N. P., Ratovsky K. G. (2006). Large-scale disturbances of auroral origin during strong magnetic storms of October 29—31, 2003, and November 7—11, 2004, according to the data of the GPS network and ionosondes. *Geomagnetism and Aeronomy*, **46** (5), 603—608.
7. Afraimovich, E. L., Kosogorov, E. A., Leonovich. L. A., Pirog O. M. (2002). Global pattern of large-scale ionospheric disturbances during the magnetic storm of September 25, 1998, as inferred from GPS network data. *Geomagnetism and Aeronomy*, **42**(4), 467—473.
8. Barkhatov N. A., Barkhatova O. M. (2012). Revealing the classes of ionospheric disturbances on the basis of multiyear data on the critical frequency of the F2 layer. *Geomagnetism and Aeronomy*, **52** (4), 510—518.
9. Belikovich V. V., Benediktov E. A., Vyakhirev V. D., Grishkevich L. V. (1980). Night ionization of the D region and of the midlatitude ionosphere in the period of magnetic storm. *Geomagnetism and Aeronomy*, **20** (3), 547—548 [in Russian].
10. Breus T. K., Baevskii R. M., Funtova I. I., et al. (2008). Effect of geomagnetic field disturbances on the adaptive stress reaction of cosmonauts. *Cosmic Research*, **46** (4), 367—372.
11. Breus T. K., Halberg F., Cornelissen G. (1995). Biological effects of solar activity. *Biofizika*. **40**, 737—749 [in Russian].
12. Bryunelli B. E., Namgaladze A. A. (1987). *Physics of the ionosphere*. Moscow: Nauka Publ. [in Russian].
13. Burmaka V. P., Lysenko V. N., Chernogor L. F. (2005). Observation data on wave-like processes in ionosphere under quiet and disturbed conditions. *Space Science and Technology*, **11** (1/2), 37 — 57 [in Russian].
14. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. (2006). Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 1. Kharkov incoherent scatter radar observations. *Geomagnetism and Aeronomy*, **46** (2), 183—198.
15. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. (2006). Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 2. Analysis of observations and simulation. *Geomagnetism and Aeronomy*, **46** (2), 199—208.
16. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. (2005). Results of investigations of the wave disturbances in the ionosphere by noncoherent scattering. *Adv. Modern Radiophys.*, **3** (4), 4—35 [in Russian].

17. Burmaka V. P., Chernogor L. F. (2011). Wave activity in the ionosphere during the geospace storm of November 7–10, 2004. *Geomagnetism and Aeronomy*, **51** (3), 305–320.
18. Burmaka V. P., Chernogor L. F. (2008). The wave-like disturbances in the ionosphere during vernal equinox in 2006. *Space Science and Technology*, **14** (4), 82–91 [in Russian].
19. Vitinskiy Yu. P. (1983). *Solar activity*. Moscow: Nauka Publ., 193 p. [in Russian].
20. Vladimirovskiy B. M., Temuryants N. A. (2000). *Influence of solar activity on biosphere-noosphere*. Moscow: Pub. MNEPU, 374 p. [in Russian].
21. Vladimirovskiy B. M., Temuryants N. A., Martinuk V. S. (2004). *Cosmic Weather and our life*. Fryazino, 224 p. [in Russian].
22. Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Yu. P., Tsymbal A. M., Chernogor L. F. (1999). Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 2. Processes in a Modified Ionosphere. Signal Parameter Variations. Disturbance Simulation. *Telecommunications and Radio Engineering*, **53** (6), 1–22.
23. Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Yu. P., Tsymbal A. M., Chernogor L. F. (1999). Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. *Technical Facilities, Telecommunications and Radio Engineering*, **53** (4–5), 6–20.
24. Garmash, K. P., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M., Chernogor L. F. (1999). Radio-propagation studies of the processes acting in the near-earth plasma disturbed by high-energy sources. Part 1. *Foreign Radio Electronics. Progress in Modern Radio Electronics*, No. 7, P. 3–15 [in Russian].
25. Garmash K. P., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M., Chernogor L. F. (1999). Radio-propagation studies of the processes acting in the near-earth plasma disturbed by high-energy sources. Part 2. *Foreign Radio Electronics. Progress in Modern Radio Electronics*, **8**, 3–19 [in Russian].
26. Herman J. R., Goldberg R. A. (1978). *Sun, Weather, and Climate*. Washington, D.C.: NASA.
27. Gokov A. M., Chernogor L. F. (2005). Electron density variations in the ionospheric D region at mid-latitudes during magnetic storms. *Space Science and Technology*, **11** (5/6), 12–21 [in Russian].
28. Gokhberg M. B., Morgunov V. A., Pokhotelov O. A. (1988). *Seismo-Electromagnetic Phenomena*. Moscow: Nauka [in Russian].
29. Gokhberg M. B., Shalimov S. L. (2008). *Impact of Earthquakes and Explosions on the Ionosphere*. Moscow, Nauka [in Russian].
30. Grigorenko Ye. I., Emelyanov L. Ya., Pazura S. A., Chernogor L. F. (2007). Ionospheric processes during the 7–10 November 2004 extreme geospace storm. 1. Observation results. *Space Science and Technology*, **13** (4), 62–76 [in Russian].
31. Grigorenko Ye. I., Pazura S. A., Chernogor L. F. (2007). Ionospheric processes during the 7–10 November 2004 extreme geospace storm. 2. Simulation results and discussion. *Space Science and Technology*, **13** (4), 77–90 [in Russian].
32. Grigorenko E. I., Taran V. I., Lazorenko S. V., Chernogor L. F. (2003). Wave disturbances in the ionosphere accompanied the solar flare and the strongest magnetic storm of September 25, 1998. *Geomagnetism and Aeronomy*, **43** (6), 718–735.
33. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Pazyura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F. (2007). Ionospheric disturbances during the severe magnetic storm of November 7–10, 2004. *Geomagnetism and Aeronomy*, **47** (6), 720–738.
34. Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. (2007). Analysis and classification of ionosphere storms at the midlatitudes of Europe. 1. *Space Science and Technology*, **13** (5), 58–76 [in Russian].
35. Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. (2007). Analysis and classification of ionosphere storms at the midlatitudes of Europe. 2. *Space Science and Technology*, **13** (5), 77–96 [in Russian].
36. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. (2005). F. Specific features of the ionospheric storm of March 20–23, 2003. *Geomagnetism and Aeronomy*, **45** (6), 745–757.
37. Grigorenko Y. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. (2003). Radio studies of processes in the ionosphere associated with the strongest September 25, 1998 geomagnetic storm. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, **9**, 57–94 [in Russian].
38. Grigorenko E. I., Pazura S. A., Taran V. I., Chernyaev S. V., Chernogor L. F. (2005). Dynamic processes in the ionosphere during the severe magnetic storm of May 30–31, 2003. *Geomagnetism and Aeronomy*, **45** (6), 758–777.
39. Danilov A. D., Kazimirovskiy E. S., Vergasova G. V., Khatchikjan G. Ja. (1987). *Meteorological effects in the ionosphere*. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
40. Danilov A. D., Morozova L. D. (1985). Ionospheric storms in the F2 region. Morphology and physics (review). *Geomagnetism and Aeronomy*, **25** (5), 705–721 [in Russian].
41. Domnin I. F., Kotov D. V., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2011). Investigation of physical processes in geospace over the Ukraine using incoherent scatter radar. *Long-term future of space studies in the Ukraine* Kyiv: Akademperiodyka, 62–74 [in Russian].
42. Druzhynin I. P., Khamyanova N. R. (1969). *Solar Activity and Abrupt Changes in the Course of Natural Processes on Earth*. Moscow: Nauka [in Russian].

43. Dubrov A. P. (1974). *Geomagnetic Field and Life*. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
44. Yermolaev Yu. I., Zelenyi L. M., Zastenker G. N., Petrukovich A. A., Yermolaev M. Yu., Nikolaeva N. S., Panasyuk M. I., Kuznetsov S. N., Myagkova I. N., Murav'eva E. A., Yushkov B. Yu., Veselovsky I. S., Dmitriev A. V., Zhukov A. N., Yakovchouk O. S., Kuznetsov V. D., Chertok I. M., Ishkov V. N., Belov A. V., Eroshenko E. A., Yanke V. G., Gaidash S. P., Kanonidi Kh. D., Kuzin S. V., Zhitnik I. A., Ignat'ev A. P., Slemzin V. A., Sukhodrev N. K., Shestov S. A., Eselevich M. V., Eselevich V. G., Rudenko G. V., Dvornikov V. M., Sdobnov V. E., Kravtsova M. V., Bogod V. M., Kotel'nikov V. S., Pershakov L. A., Beloglazov M. I., Vlasov V. I., Chashei I. V., Kleimenova N. G., Kozyreva O. V., Kozlov V. I., Parkhomov V. A., Kugaenko Yu. A., Khisamov R. Z., Yanchukovskii V. L., Kudela K. (2005). A year later: Solar, heliospheric, and magnetospheric disturbances in November 2004. *Geomagnetism and Aeronomy*, **45** (6), 681—719.
45. Sagdeev R. Z., Usikov D. A., Zaslavsky G. M. (1988). *Introduction to the Nonlinear Physics*. New York, Harwood.
46. Kishchuk V. P., Marchenko S. G., Sokolov S. N. (1993). Effects of Large-Scale Precipitation of Relativistic Magnetospheric Electrons during and after the Geomagnetic Storm of November 27—28, 1990, according to the VLF Propagation Data. *Geomagnetism and Aeronomy*, **33** (4), 93—100 [in Russian].
47. Kleimenova N. G., Kozyreva O. V., Rozhnoy A. A., Solov'eva M. S. (2004). Variations in the VLF signal parameters on the Australia-Kamchatka radio path during magnetic storms. *Geomagnetism and Aeronomy*, **44** (3), 354—361.
48. Klimontovich Yu. L. (1996). Relative ordering criteria in open systems. *Physics-Uspokhi*, **39** (11), 1169—1179
49. Kozyreva O. V., Kleimenova N. G., Kornilova T. A., Kauriste K., Manninen J., Ranta A. (2006). Unusual spatial-temporal dynamics of geomagnetic disturbances during the main phase of the extremely strong magnetic storm of November 7—8, 2004. *Geomagnetism and Aeronomy*, **46** (5), 580—592.
50. Kozyreva O. V., Kleimenova N. G., Schott J.-J. (2004). Geomagnetic pulsations at the initial phase of a magnetic storm. *Geomagnetism and Aeronomy*, **44** (1), 33—41.
51. *Space Project "Ionosat-Micro"* (2013). Kyiv: Academperiodika [in Russian].
52. Kremenetskiy I. O., Cheremnykh O. K. (2009). *Space weather: mechanisms and manifestations*. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
53. Kurkin V. I., Pirog O. M., Polekh N. M., Tashchilin A. V., Shpynov B. G., Kruchinina M. A. (2002). *Complex Studies of Ionospheric Effects of Geomagnetic Storms in Northeastern Russia*. Proceedings of XX All-Russian Conference on Radio Propagation (Nizhnii Novgorod, July 2—4, 2002). Nizhnii Novgorod, 2002, 62—63 [in Russian].
54. Lazorenko O. V., Chernogor L. F. (2009). *Ultra-wideband signals and processes: Monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian].
55. Liperovskiy V. A., Pohotelov O. A., Shalimov S. L. (1992). *Ionosphere precursors of the earthquakes*. Moscow: Nauka [in Russian].
56. Masamura S. (1971). *Effect of Solar Activity on Earth's Atmosphere and Biosphere*. Moscow: Nauka [in Russian].
57. Mizun Yu. G. (1997). *Space and Health*. Moscow: VECHE, AST [in Russian].
58. Mizun Yu. G. (1986). *Space and Health*. Moscow: Nauka [in Russian].
59. Miroshnichenko L. I. (2011). The Sun — Earth Problem: Modern Concepts and Physical Mechanisms. *Space Science and Technology*, **17** (1), 17—22 [in Russian].
60. Miroshnichenko L. I. (1981). *Solar Activity and the Earth*. Moscow: Nauka [in Russian].
61. Miroshnichenko L. I. (2011). *Physics of the Sun and solar-terrestrial relations*. Moscow: Universitetskaya Kniga Publ. [in Russian].
62. Moiseeva N. I., Sysuev V. M. (1981). *The Temporal Medium and Biological Rhythms*. Leningrad: Nauka [in Russian].
63. Monin A. S., Shishkov Yu. A. (2000). Climate as a problem of physics. *Phys. Usp.*, **43** (4), 381—406.
64. Musatenko S. I. (1980). Near-Earth Space Radiation as a Result of Solar Flares Influence on Earth magnetosphere and ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, **20** (5), 884—888 [in Russian].
65. Ostapenko A. A., Maltsev Yu. P. (2005). Relation of the Electromagnetic Energy Flux into the High-Latitude Ionosphere to Solar Wind Parameters. *Geomagnetism and Aeronomy*. **45** (2), 164—169.
66. Panasenko S. V., Chernogor L. F. (2007). Event of the November 7—10, 2004, magnetic storm in the lower ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, **47** (5), 608—620.
67. Panasenko S. V., Chernogor L. F. (2005). Results of Radar Studies of Wave Disturbances in the Lower Ionosphere. *Usp. Sovrem. Radioelektron*, **7**, 38—56 [in Russian].
68. Polekh N. M., Pirog O. M., Voeikov S. V., Tatarinov P. V., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Dumbrava Z. F. (2006). Ionospheric disturbances in the east-Asian region during the geomagnetic period in November 2004. *Geomagnetism and Aeronomy*, **46** (5), 593—602.
69. Potapov A. A., Chernogor L. F. (2010). Physical processes in nonlinear system Space — Earth: the channels of effect at biosphere (human). *Nelinejnyj mir*, **8** (6), 347—360 [in Russian].
70. *Heliobiology Problems* (1977). Novosibirsk: Novosibirsk State. med. University [in Russian].

71. Pudovkin, M. I., Raspopov O. M. (1992). Mechanism of impact of solar activity on the lower atmosphere state and meteorological parameters (review). *Geomagnetism and Aeronomy*, **32** (5), 1–22 [in Russian].
72. Pulnits S. A., Davidenko D. V., Ouzounov D. P., Karelin A. V. (2015). Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system. *Geomagnetism and Aeronomy*, **55** (4), 521–538.
73. Rozhnoy A. A., Kleimenova N. G., Kozyreva O. V., Solovieva M. S. (2005). Influence of the solar wind and IMF irregularities on the parameters of LF (40 kHz) signals on the midlatitude path. *Geomagnetism and Aeronomy*, **45** (4), 431–437.
74. Sidiyakin V. G., Temur'yants N. A., Makeyev V. B., Vladimirkii B. M. (1985). *Cosmic Ecology*. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
75. Sokolov S. N. (2011). Magnetic storms and their effects in the lower ionosphere: Differences in storms of various types. *Geomagnetism and Aeronomy*, **51** (6), 741–752.
76. King J. W., Newman W. S. (eds.) (1966). *Solar-Terrestrial Physics*. New York: Academic Press.
77. Mc Cormac B. M., Seliga T. A. (eds.) (1979). *Solar terrestrial influences on weather and Climate*. Dordrecht: Reidel.
78. Taran V. I. (2001). A study of the natural and artificially disturbed ionosphere by the incoherent scatter method. *Geomagnetism and Aeronomy*, **41** (5), 632–639.
79. Uryadov V. P., Kurkin V. I., Vertogradov G. G., Vertogradov V. G., Ponyatov A. A., Ponomarchuk S. N. (2004). Features of propagation of HF signals on mid-latitude paths under conditions of geomagnetic disturbances. *Radiophysics and Quantum Electronics*, **47** (12), 933–946.
80. Sunyaev R. A. (Ed.) (1986). *Physics of Space*. Second edition, corrected and enlarged. Moscow: Soviet Encyclopedia [in Russian].
81. Hasnulin V. I. (1992). *Cosmic secrets of your well-being*. Novosibirsk: Nauka [in Russian].
82. Chernogor L. F. (2004). The ammunition explosions on military bases as a source of ecological catastrophe in Ukraine. *Ekologiya i resursy*, **10**, 55–67 [in Russian].
83. Chernogor L. F. (2008). The explosions on gas pipeline and gas reservoir accidents are ecologic catastrophe sources in Ukraine. *Ekologiya i resursy*, **3**, 56–72 [in Russian].
84. Chernogor L. F. (2017). Action of variations in space and tropospheric weather on the biosphere: Systems approach. *A. L. Chizhevsky. Contribution to science and culture. I International Scientific and Practical Conference dedicated to the preservation of the creative heritage and the development of A. L. Chizhevsky's ideas. Materials*. Kaluga: Publ. house AKF “Politop”, 101–103 [in Russian].
85. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2018). Magnetospheric and Ionospheric Effects Accompanying the Strongest Technogenic Catastrophe. *Geomagnetism and Aeronomy*, **58** (5), 673–685.
86. Chernogor L. F., Garmash K. P., Podnos V. A., Tyrnov O. F. (2013). The V. N. Karazin Kharkiv National University Radio physical Observatory — the tool for ionosphere monitoring in space experiments. eds. *Space Project “Ionosat-Micro”* (Eds S. A. Zasukha, O. P. Fedorov). Kyiv: Akadempriodika Publ., 160–182 [in Russian].
87. Chernogor L. F. (2002). Geo-cosmosphere — The open nonlinear dynamic system. *Radiofizika i elektronika*, **2** (570), 175–180 [in Russian].
88. Chernogor L. F. (2004). Geophysical Effects and Geoecological Consequences of Multiple Chemical Explosions at Ammunition Dumps in Artemovsk. *Geophys. J.*, **26** (4), 31–44 [in Russian].
89. Chernogor L. F. (2004). Geophysical Effects and Ecological Consequences of the Fire at the Military Base Near Melitopol City. *Geophys. J.*, **26** (6), 61–73 [in Russian].
90. Chernogor L. F. (2008). Geoecologic influence of the ammunition explosion. *Geoecology. Engineering geology. Hydroecology. Geocriology*, **4**, 359–369 [in Russian].
91. Chernogor L. F., Domnin I. F. (2014). *Physics of geospace storms*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian].
92. Chernogor L. F. (2003). The Earth — atmosphere — geospace environment system as an opened dynamic nonlinear one. *Space Science and Technology*, **9** (5/6), 96–105 [in Russian].
93. Chernogor L. F. (2006). Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere as an open dynamic nonlinear physical system (Part 1). *Nelinejnyj mir*, **4** (12), 655–697 [in Russian].
94. Chernogor L. F. (2007). Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere as an open dynamic nonlinear physical system (Part 2). *Nelinejnyj mir*, **5** (4), 225–246 [in Russian].
95. Chernogor L. F. (2010). Channels of the impact of variations of cosmic and atmospheric factors on the biosphere and human being. *J. Physiology*, **56** (3), 25–40 [in Russian].
96. Chernogor L. F. (2017). Channels for the action of space and tropospheric weather on human being. *A. L. Chizhevsky. Contribution to science and culture. I International Scientific and Practical Conference dedicated to the preservation of the creative heritage and the development of A. L. Chizhevsky's ideas. Materials*. Kaluga: Publ. house AKF “Politop”, 104–107 [in Russian].

97. Chernogor L. F. (2004). *Non-linear Radio Physics*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian].
98. Chernogor L. F. (2008). *On the Nonlinearity in Nature and Science: Monograph*. Kharkiv: Kharkiv V. N. Karazin National University Publ. [in Russian].
99. Chernogor L. F. (2009). *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Engine Burn*. Kharkiv: Kharkiv V. N. Karazin National University Publ. [in Russian].
100. Chernogor L. F. (2008). Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results. *Geomagnetism and Aeronomy*, **48** (5), 652—673.
101. Chernogor L. F. (2011). The Sun — interplanetary space — magnetosphere — ionosphere — atmosphere — Earth as an open non-equilibrium nonlinear physical system, 1. *J. Problem of the Evolution of Open Systems*, **13** (1), 22—66 [in Russian].
102. Chernogor L. F. (2013). The Sun—interplanetary medium—magnetosphere—ionosphere—atmosphere—Earth as an open non-equilibrium nonlinear physical system, 2. *J. Problem of the Evolution of Open Systems*, **15** (1), 43—87 [in Russian].
103. Chernogor L. F. (2006). The tropical cyclone as an element of the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. *Space Science and Technology*, **12** (2/3), 16—26 [in Russian].
104. Chernogor L. F. (2011). Physics of the geospace and space weather: Systems approach, achievements, research strategy. *Long-term future of space studies in the Ukraine*. Kyiv: Akadempriodyka, 55—61 [in Russian].
105. Chernogor, L. F. (2003). Physics of Earth, Atmosphere, and Geospace from the Standpoint of System Paradigm. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **8** (1), 59—106 [in Russian].
106. Chernogor, L. F., Domnin, I. F. (2014). *Physics of Geospace Storms: monograph*. Kharkiv: Kharkiv V. N. Karazin National University Publ. [in Russian].
107. Chernogor L. F. (2007). Physics and ecology of the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. The sciences about the Earth and space for society. The Proceedings of the first scientific Conference, Kyiv, June 25—27, 2007 (NANU-NTsADZ IGN, GAO, Kyiv, 2007) 86—93 [in Russian].
108. Chernogor L. F. (2003). Physical processes in the near-Earth environment associated with March — April 2003 Iraq war. *Space Science and Technology*, **9** (2/3), 13—33 [in Russian].
109. Chernogor L. F. (2006). Ecological consequences of multiple chemical explosions in anthropogenic catastrophe. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, **6**, 522—535 [in Russian].
110. Chernogor L. F. (1999). Energetics of the processes occurring on the Earth, in the atmosphere and near-Earth space in connection with the project “Early warning”. *Space Science and Technology*, **5** (1), 38—47 [in Russian].
111. Chibisov S. M. (2006). Biorhythms and heliophysical Factors. *Fundamental Research*, **9**, 34—41 [in Russian].
112. Chizhevsky A. L. (1976). *The Terrestrial Echo of Solar Storms*. 2nd ed. Moscow: Mysl [in Russian].
113. Shuster H. G. (1988). *Deterministic Chaos: An Introduction*. Weinheim, Federal Republic of Germany / New York, VCH Verlagsgesellschaft mbH/VCH Publishers.
114. Yampolski Y. M., Zalizovski A. V., Zanimonskiy E. M., Lizunov G. V., Lisachenko V. N. (2008). Coupling of the weather system in the atmosphere and in space. *Space Science and Technology*, **14** (5), 6—36 [in Russian].
115. Yampolski Yu. M., Zalizovski A. V., Litvinenko L. M., Lizunov G. V., Groves K., Moldwin M. (2004). Magnetic Field Variations in Antarctica and the Conjugate Region (New England) Stimulated by Cyclone Activity. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **9** (2), 130—151 [in Russian].
116. Albertson V. D., Thorson J. M. (1974). Power system disturbances during a K 8 geomagnetic storm: August 4, 1972, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS 93**, 1025—1030.
117. Bailey G. J., Moffett R. J., Murphy J. A. (1979). Calculated daily variations of O⁺ and H⁺ at mid-latitudes. II. Sunspot maximum results. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **41**, 471—482.
118. Balan, N., Rao P. B. (1990). Dependence of ionospheric response on the local time of sudden commencement and intensity of storms. *J. Atmos. Terr. Phys.* **52**, 269—275.
119. Banks P. M. (1966). Charged particle temperatures and electron thermal conductivity in the upper atmosphere. *Ann. Geophys.*, **22**, 577—584.
120. Benestad R. E. (2002). *Solar activity and earth's climate*. Springer-Praxis.
121. Bilitza D. (1997). International Reference Ionosphere-Status. *Adv. Space Res.* **20** (9), 1751—1754.
122. Bilitza D. (1997). Preface. *Adv. Space Res.* **20** (9), 1649.
123. Blanc M., Richmond A. D. (1980). The ionospheric disturbance dynamo. *J. Geophys. Res.*, **85**, 1669—1686.
124. Bothmer V., Daglis I. (2006). *Space Weather: Physics and Effects*. New York: Springer-Verlag. ISBN 3-642-06289-X.
125. Bradley P. A., Cander L. R., Kutiev I., Hanbaba R. (1997). PRIME (COST 238) Studies of Ionospheric Storm Effects. *Adv. Space Res.*, **20** (9), 1669—1678.
126. Breus T. K., Ozheredov V. A., Syutkina E. V., Rogoza A. N. (2008). Some aspects of the biological effects of Space Weather. *J. Atmos. and Sol-Terr Phys.*, **70** (2—4), 436—441.
127. Buonsanto M. J. (1995). A case study of the ionospheric storm dusk effects. *J. Geophys. Res.*, **100** (A12), 23,857—23,869.

128. Buonsanto M. J., Codrescu M., Emery B. A., Fesen C. G., Fuller-Rowell T. J., Melendez-Alvira D. J., Sipler D. P. (1997). Recent Results of the CEDAR Storm Study. *Adv. Space Res.*, **20** (9), 1655—1664.
129. Buonsanto M. J., Foster J. C., Sipler D. P. (1992). Observations From Millstone Hill During the Geomagnetic Disturbances of March and April 1990. *J. Geophys. Res.*, **97**, 1225—1243.
130. Buonsanto M. J. (1999). Ionospheric Storms—a Review. *Space Sci. Reviews.*, **88**, 563—601.
131. Buonsanto M. J.; González S. A.; Pi, X.; Ruohoniemi J. M.; Sulzer M. P.; Swartz W. E.; Thayer J. P.; Yuan D. N. (1999). Radar Chain Study of the May, 1995 Storm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **61**, 233—248.
132. Buonsanto M. J. (1995). Millstone Hill Incoherent Scatter F Region Observations During the Disturbances of June 1991. *J. Geophys. Res.*, **100** (A4), 5743—5755.
133. Burns A. G., Killeen T. L., Deng W., Carignan G. R., Roble R. G. (1995). Geomagnetic storm effects in the low- to middle-latitude upper thermosphere. *J. Geophys. Res.*, **100**, 14673—14691.
134. Burns A. G., Killeen T. L., Roble R. G. (1991). A theoretical study of thermospheric composition perturbations during an impulsive geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.*, **96** (A8), 14,153—14,167.
135. Carlowicz M. J., Lopez R. E. (2002). *Storms from the Sun*. Washington DC, Joseph Henry Press. ISBN 0-309-07642-0.
136. Chernogor L. F., Blaunstein N. (2013). *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group.
137. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I. (2007). Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations. *Int. J. Geomagn. Aeron.*, **7**, G13001. doi:10.1029/2005GI000125.
138. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2008). Earth — Atmosphere — Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **13** (2), 120—137.
139. Chernogor L. F. (2011). The Earth — atmosphere — geospace system: main properties and processes. *Int. J. Rem. Sens.*, **32** (11), 3199—3218.
140. Danilov A. D., Lastovička J. (2001). Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *Int. J. Geomagn. Aeron.*, **2** (3), 209—224.
141. *Encyclopedia of Nonlinear Science* (2006). (Ed. Alwyn Scott). New York and London: Routledge.
142. Essex E. A., Mendillo M., Schödel J. P., Klobuchar J. A., da Rosa A. V., Yeh K. C. Fritz R. B., Hibberd F. H., Kersley L., Koster J. R., Matsoukas D. A., Nakata Y., Roelofs T. H. (1981). A global response of the total electron content of the ionosphere to the magnetic storms of 17 December and 18 June 1972. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **43**, 293—306.
143. Field P. R., Rishbeth H. (1997). The response of ionospheric F2-layer to geomagnetic activity: an analysis of worldwide data. *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, **59** (2), 163—180.
144. Foster J. C., Cummer S., Inan U. S. (1998). Midlatitude particle and electric field effects at the onset of the November 1993 Geomagnetic Storm. *J. Geophys. Res.*, **103**, 26,359—26,366.
145. Foster J. C., Rich F. J. (1998). Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, **103**, 26,367—26,372.
146. Foster J. C. (1993). Storm-time plasma transport at middle and high latitudes. *J. Geophys. Res.*, **98**, 1675—1689.
147. Freeman J. W. (2001). *Storms in Space*. London, New York: Cambridge University Press.
148. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Moffett R. J., Quegan S. (1994). Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, **99**, 3893—3914.
149. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Roble R. G., Richmond A. D. (1998). How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? Magnetic storms. (Eds Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K.) Washington, D.C., American Geophysical Union, Geophysical monograph series, **98**, 203—225
150. Gonzales C. A., Kelley M. C., Behnke R. A., Vickrey J. F., Wand R., Holt J. (1983). On the Latitudinal Variations of the Ionospheric Electric Field During Magnetospheric Disturbances. *J. Geophys. Res.*, **88** (A11), 9135—9144.
151. Gonzales W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W. (1994). What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.*, **99** (A4), 5771—5792.
152. Goodman J. M. (2005). *Space Weather and Telecommunications*. New York: Springer.
153. Horsthemke W., Lefever R. (2006). *Noise-induced Transitions. Theory and Applications in Physics, Chemistry, and Biology*. Berlin-Tokyo: Springer-Verlag.
154. *International Solar Terrestrial physics*. URL: <https://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/> (Last accessed 12.09.2018).
155. Jacovchouk O. S., Mursula K., Hollappa L., Veselovsky I. S., Karinen A. (2012). Average properties of geomagnetic storms in 1932—2009. *J. Geophys. Res.*, **117**, A03201. DOI: 10.1029/2011ja017093.
156. Jones K. L., Rishbeth H. (1971). The origin of storm increases of mid-latitude F-layer electron concentration. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 391—401.

157. Kallenrode May-Britt. Space Physics (2004): *An introduction to plasmas and particles in the heliosphere and magnetospheres*. New York: Springer.
158. Kivelson M. G., Russell Ch. T. (1995). *Introduction to Space Physics*. Cambridge: Cambridge Atmospheric & Space Science Series.
159. Kleimenova N. G., Kozyreva O. V., Breus T. K., Rapoport S. I. (2007). Pc-1 geomagnetic pulsations as a potential hazard of myocardial infarction. *J. Atmos. and Sol-Terr Phys.*, **69**, 1759–1764.
160. Knipp D. J., Crooker N., Engebretson M., Li X., McAllister A. H., Mukai T., Kokubun S., Reeves G. D., Obara T., Weatherwax A. N., Emery B. A. (1998). An Overview of the Early November 1993 Geomagnetic Storm. *J. Geophys. Res.*, **103**, 26,197–26,220.
161. Knipp D. J., Fraser B. J., Shea M. A., Smart D. F. (2018). On the Little-Known Consequences of the 4 August 1972 Ultra-Fast Coronal Mass Ejecta: Facts, Commentary, and Call to Action. *Space Weather*, **16**, № 11, 1635–1643.
162. Knipp D. J., Ramsay A. C., Beard E. D., Boright A. L., Cade W. B., Hewins I. M., McFadden R. H., Denig W. F., Kilcommons L. M., Shea M. A., Smart D. F. (2016). The May 1967 great storm and radio disruption event: Extreme space weather and extraordinary responses. *Space Weather*, **14**, 614–633.
163. Lakhina G. S., Alex S., Tsurutani B. T., Gonzalez W. D. (2013). Supermagnetic storms: Hazard to society. (Eds A. S. Sharma, A. Bunde, V. P. Dimri, D. N. Baker). Extreme events and natural hazards: The complexity perspective. Washington, DC: American Geophysical Union, 267–278.
164. Lathuillière C., Menvielle M., Lilensten J., Amari T., Radicella S. M. (2002). From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments. *Annales Geophysicae*, **20** (7), 1081–1104.
165. Lilensten J., Bornarel J. (2005). *Space Weather, Environment and Societies*. Berlin/New York: Springer. ISBN 978-1-4020-4331-4.
166. Lin C. H., Richmond A. D., Heelis R. A., Bailey G. J., Lu G., Liu J. Y., Yeh H. C., Su S.-Y. (2005). Theoretical study of the low and mid latitude ionospheric electron density enhancement during the October 2003 storm: Relative importance of the neutral wind and the electric field. *J. Geophys. Res.*, **110**, A12312. doi: 10.1029/2005JA011304.
167. Loewe C. A., Pross G. W. (1997). Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res.*, **102**, 14209–14213.
168. Lu G., Goncharenko L. P., Richmond A. D., Roble R. G., Aponte N. (2008). A dayside ionospheric positive storm phase driven by neutral winds. *J. Geophys. Res.*, **113**, A08304. doi:10.1029/2007JA012895.
169. Mannucci, A. J.; Tsurutani, B. T.; Iijima, B. A.; Komjathy, A.; Saito, A.; Gonzalez, W. D.; Guarnieri, F. L.; Kozyra, J. U.; Skoug, R. (2005). Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29–30, 2003 “Halloween storms”. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L12S02. doi:10.1029/2004GL021467.
170. Matsushita S. (1959). A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.*, **64**, 305–321.
171. Matuura N. (1972). Theoretical models of ionospheric storms. *Space Sci. Rev.*, **13**, 124–189.
172. Mayr H. G., Volland H. (1983). Magnetic storm characteristics of the thermosphere. *J. Geophys. Res.*, **78**, 2251–2264.
173. Mendillo M., Narvaez C. (2009). Ionospheric storms at geophysically equivalent sites. Part 1: Local time patterns for subauroral ionospheres. *Ann. Geophys.*, **27**, 1679–1694.
174. Mendillo M., Narvaez C. (2010). Ionospheric storms at geophysically equivalent sites. Part 2: Local time patterns for subauroral ionospheres. *Ann. Geophys.*, **28**, 1449–1462.
175. Mendillo M. (2006). Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.*, **44**, RG4001. doi:10.1029/2005RG000193.
176. Mikhailov A. V., Förster M. (1999). Some F2-layer Effects During the January 06–11, 1997 CEDAR Storm Period as Observed with the Millstone Hill Incoherent Scatter Facility. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **61**, 249–261.
177. Mikhailov A. V., Foster J. C. (1997). Daytime Thermosphere Above Millstone Hill During Severe Geomagnetic Storms. *J. Geophys. Res.* **102**, 17,275–17,282.
178. Mishin E., Foster J. C., Potekhin A. P. (2000). Ionospheric perturbations caused by quasi-periodic magnetic disturbances during the September 25, 1998 storm. *EOS Trans. AGU*, **81** (48), Fall Meeting. F 947. San Francisco. USA.
179. Mishin E., Foster J. C., Rich F. J., Taran V. I. (2001). Prompt ionospheric response to short period solar wind variations during the magnetic cloud event Sep 25, 1998. *EOS Trans. AGU*, **81** (20), Spring Meeting. S 291. San Francisco. USA. May 15.
180. Moldwin M. (2008). *An introduction to space weather*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
181. National Space Weather Program. URL: <http://www.spaceweathercenter.org/swop/NSWP/1.html> (Last accessed 12.09.2018).
182. Ngwira C. M., McKinnell L.-A., Cilliers P. J. (2012). Ionospheric observations during the geomagnetic storm events on 24–27 July 2004: Long-duration positive storm effects. *J. Geophys. Res.*, **117** (A1). doi: 10.1029/2011JA016990.

183. Obayashi T. (1964). Morphology of Storms in the Ionosphere. *Rev. Geophys.*, **1**, 335—366.
184. Pavlov A. V., Buonsanto M. J., Schlesier A. C., Richards P. G. (1999). Comparison of Models and Data at Millstone Hill During the 5—11 June 1991 Storm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **61**, 263—279.
185. Pavlov A. V., Buonsanto M. J. (1996). Using Steady-state Vibrational Temperatures to Model Effects of N₂* on Calculations of Electron Densities. *J. Geophys. Res.*, **101**, 26,941—26,945.
186. Pavlov A. V. (1998). The Role of Vibrationally Excited Oxygen and Nitrogen in the Ionosphere during the Undisturbed and Geomagnetic Storm Period of 6—12 April 1990. *Ann. Geophys.*, **16**, 589—601.
187. *Physics of the Space Environment* (2006). (Eds Gombosi T. I., Houghton J. T., Dessler A. J.). Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-60768-1.
188. Pirog O. M., Polekh N. M., Voeykov S. V., Zherebtsov G. A., Tatarinov P. V. (2007). Ionospheric disturbances in the East-Asian region during geomagnetic storm in November, 2004. *Adv. in Space Res.*, **39**, 1335—1341.
189. Prölss G. W. (1995). Ionospheric F region storms. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics* (Ed. H. Volland). Boca Raton, Fla: CRC Press, 195—248.
190. Prölss G. W., Jung M. J. (1978). Traveling atmospheric disturbances as a possible explanation for daytime positive storm effects of moderate duration at middle latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **40**, 1351—1354.
191. Prölss G. W. (1998). Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere. (Eds Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K.). Magnetic storms. Washington, D.C. American Geophysical Union, Geophysical monograph series, **98**, 249—290.
192. Prölss G. W. (1993). On explaining the local time variation of ionospheric storm effects. *Ann. Geophys.*, **11**, 1—9.
193. Pulinet S., Boyarchuk K. (2004). Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin: Springer-Verlag.
194. Rastogi R. G. (1977). Geomagnetic storms and electric fields in the equatorial ionosphere. *Nature*. **268**, 422—424.
195. Reddy C. A., Nishida A. (1992). Magnetospheric Substorms and Nighttime Height Changes of the F₂ Region at Middle and Low Latitudes. *J. Geophys. Res.*, **97**, № A3, 3039—3061.
196. Rees D. (1995). Observation and modeling of ionospheric and thermospheric disturbances during major geomagnetic storms: a review. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **57**, №. 12, 1433—1457.
197. Reeves G. D., McAdams K. L., Friedel R. H. W., O'Brien T. P. (2003). Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms. *Geophys. Res. Lett.*, **30** (10), 36-1—36-4.
198. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., Sipler D. P. (1994). Ionospheric Effects of the March 1990 Magnetic Storm: Comparison of Theory and Measurement. *J. Geophys. Res.*, **99**, № A12, 23,359—23,365.
199. Richmond A. D., Matsushita S. (1975) Thermospheric response to a magnetic substorm. *J. Geophys. Res.*, **80**, 2839—2850.
200. Robinson R. M. (2006). Book Review: Space Weather, Environment and Societies — Space Weather, 4, S05004. DOI:10.1029/2006SW000243.
201. Roble R. G., Dickinson R. E., Ridley E. C. (1982). Global circulation and temperature structures of thermosphere with high-latitude convection. *J. Geophys. Res.*, **87**, 1599—1614.
202. Schunk R. W., Sojka J. J. (1996). Ionosphere-Thermosphere Space Weather Issues. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **58**, 1527—1574.
203. Schwenn R. (2006). Space Weather, Living Reviews in Solar Physics 3. 2. online article.
204. Schunk R. W., Nagy A. F. (1978). Electron temperature in the F region of the ionosphere: theory and observations. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **16**, № 3, 355—399.
205. *Space Storms and Space Weather Hazards* (2001). (Ed. Daglis I. A.). New York: Springer-Verlag.
206. *Space Weather* (Geophysical Monograph) (2001). (Eds Song P., Singer H., Siscoe G.). Union, Washington, D.C.
207. Tadokoro H., Tsuchiya F., Miyoshi Y., Misawa H., Morioka A., Evans D. S. (2007). Electron flux enhancement in the inner radiation belt during moderate magnetic storms. *Ann. Geophys.*, **25**, № 6, 1359—1364.
208. Tsurutani T., Bruce E., Echer E., Guarnieri F., Kozyra J. (2008). CAWSES November 7—8, 2004, superstorm: Complex solar and interplanetary features in the post-solar maximum phase. *Geophys. Res. Lett.*, **35**. doi: 10.1029/2007GL031473.
209. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu J. Y. (2011). Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles. *J. Geophys. Res.*, **116** (A11328). doi: 10.1029/2011JA017042.
210. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Vaidyan V. K., Alleyne H., Bailey G. J. (2007). Response of the ionosphere to super storms. *Adv. Space Res.*, **41**, 548—555. doi:10.1016/j.asr.2007.08.029.
211. Willis D. M., Stevens P. R., Crothers S. R. (1997). Statistics of the largest geomagnetic storms per solar cycle (1844—1993). *Ann. Geophysicae*, **15**, № 6, 719—728.
212. Wratt D. S. (1976). Ionization enhancement in the middle latitude D region due to precipitating high energy electrons. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **38**, № 5, 511—516.
213. Yakovchouk O. S., Mursula K., Holappa L., Veselovsky I. S., Karinen A. (2012). Average properties of geomagnetic storms in 1932—2009. *J. Geophys. Res.*, **117**, № A3. doi: 10.1029/2011JA017093.

214. Yermolaev Yu. I., Zelenyi L. M., Kuznetsov V. D., Chertok I. M., Panasyuk M. I., Myagkova I. N., Zhitnik I. A., Kuzin S. V., Eselevich V. G., Bogod V. M., Arkhangelskaja I. V., Arkhangelsky A. I., Kotov Yu. D. (2008). Magnetic storm of November, 2004: Solar, interplanetary, and magnetospheric disturbances. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.*, **70**, № 2–4, 334–341.
215. Zalyubovsky I. I., Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2008). The Earth — Atmosphere — Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena. *Space Research in Ukraine. 2006—2008. The Report Prepared by the Space Research Institute of NASU-NSAU*. Kyiv, 19—29

Received 17.09.2018

L. F. Chernogor

Head of Space Radio Physics Department, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

V. N. Karazin National University of Kharkiv

4 Svobody Square, Kharkiv, 61022 Ukraine

PHYSICS OF GEOSPACE STORMS

A review of our knowledge about the coupling of solar-terrestrial processes, manifestations of geospace storms, and variations in space weather is presented. Space weather effects are analyzed within the system paradigm concept. The system where geospace storms occur is a Sun–interplanetary medium–magnetosphere–ionosphere–atmosphere–Earth (internal spheres) aggregate (SIMMIAE). An early twenty-first century geospace superstorm that occurred on November 7–10, 2004, is examined in detail. Clustered instrument observations of this storm effects are presented. The investigation of the physical effects of geospace storms is noted to be the most important field of study in space geophysics. The problem of subsystem coupling in the SIMMIAE system during a geospace storm is interdisciplinary in nature. Its solution requires an application of the system approach. The problem has a multifactor character. The subsystem response is determined by the simultaneous (synergetic) impact of a few disturbing factors. It is important to note that the SIMMIAE is an open, nonlinear, and nonstationary system. Within it, direct coupling and feedback processes, positive and negative linkages operate. Due to the myriads of manifestations of geospace storms, because of the unique nature of each storm, the investigation of occurring physical effects is far from complete. In addition to a thorough investigation of the storm's physical effects, there is an urgent need to model and forecast the storms adequately and in detail. The solution to these problems will facilitate the survival and steady progress of our civilization, relying more and more on new state-of-the-art technology. The more technologically reliant our society is, the more vulnerable the civilization's infrastructure to solar and geospace storm impacts becomes. A classification of geostorms based on Akasofu's epsilon parameter has been advanced. Six types of geostorm have been introduced, and a geostorm index has been suggested. A classification of ionospheric storms and disturbances based on the magnitude of variations in the peak density of the F2 layer has been suggested. Five types of the ionospheric storm have been introduced. An ionospheric index characterizing the intensity of negative and positive ionospheric storms has been suggested. A classification of ionospheric storms and disturbances based on the magnitude of variations in the lower-ionosphere electron density has been proposed. Six types of the positive ionospheric storm have been introduced. The appropriate ionospheric index has been suggested. The physics-based model of the evolution of each group of ionospheric storms and disturbances has been determined. The linkages among magnetic, ionospheric, and atmospheric storms, as well as electric field disturbances, have been shown.

Keywords: geospace storm, general effects, storm influence examples, system paradigm, processes energetic, solar storms, experiment results, statistic and classification of magnetic storms, statistics and classification of ionospheric storms, classification of geospace storms.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.01.078>
УДК 550.38

Д. І. ВЛАСОВ¹, пров. інж.

E-mail: dima.i.vlasov@gmail.com

О. С. ПАРНОВСЬКИЙ^{1,2}, старш. наук. співроб., пров. інж., канд. фіз.-мат. наук

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України
Проспект Академіка Глушкова 40, корп. 4/1, Київ, Україна, 03187

² Головний центр спеціального контролю

вул. Космічна 1, смт. Городок, Радомишльський район, Житомирська область, Україна, 12265

ПРОГНОЗУВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ ГЕОМАГНІТНИХ ЗБУРЕНЬ НА ПРИКЛАДІ ДАНИХ МАГНІТНОЇ ОБСЕРВАТОРІЇ «ЛЬВІВ»

Вперше в світовій практиці отримано моделі для прогнозування геомагнітних елементів X , Y , Z . В даній роботі наводяться результати такого прогнозування для магнітної обсерваторії «Львів» з глибиною прогнозу 3 години. Розроблені моделі мають такі властивості: обсерваторія — LVV ; прогнозовані величини — XYZ ; глибина прогнозу — 3 год; коефіцієнти кореляції з усередненими даними вимірювань — $0.824(X)$, $0.811(Y)$, $0.804(Z)$; ефективність прогнозування — $0.816(X)$, $0.803(Y)$, $0.801(Z)$; skill score — $0.115(X)$, $0.095(Y)$, $0.099(Z)$. Розроблені моделі пройшли апробацію у Головному центрі спеціального контролю і були визнані такими, що задовольняють основні вимоги до оперативних прогнозних моделей.

Ключові слова: космічна погода, локальна геомагнітна активність, регресійне моделювання.

Вступ. Починаючи з другої половини 2000-х років, діяльність в галузі космічної погоди почала орієнтуватися на потреби конкретних груп кінцевих споживачів. В ході цього процесу з'ясувалося, що планетарні геомагнітні індекси, які десятиліттями використовувалися професійною спільнотою, не задовольняють цих потреб. Запит на просторово розподілену інформацію про рівень геомагнітної активності задовольнявся двома основними шляхами: побудовою регіональних індексів, які переносили методики розрахунку планетарних індексів на географічно обмежені регіони, а також шляхом фізичного моделювання на суперкомп'ютерах процесів у ближньому космосі.

Ми пропонуємо якісно інший підхід до розв'язання зазначеної задачі. Він полягає у безпосередньому прогнозуванні майбутніх значень компонентів вектора напруженості геомагнітного поля на магнітних обсерваторіях та рядових магнітних спостережних пунктах. За необхідності розрахунку прогнозних значень у інших точках таку інформацію можна отримати шляхом інтерполяції прогнозних значень з найближчих спостережних пунктів з використанням, наприклад, методу комірок Вороного або схожого за змістом. Також можливо прогнозувати не компоненти вектора напруженості, а локальні геомагнітні індекси [16], які є більш простими для безпосереднього аналізу людиною, проте їх складніше

Цитування: Власов Д. І., Парновський О. С. Прогнозування локальних геомагнітних збурень на прикладі даних магнітної обсерваторії «Львів». *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 1 (128). С. 78–84. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.078>

використовувати як вхідні дані для подальших розрахунків. Крім того, такий підхід буде важче застосувати до інших магнітних обсерваторій, для яких подібні індекси не розроблено. Додаткова перевага прогнозування саме компонентів вектору напруженості полягає в тому, що вони дають змогу оцінювати швидкість зміни магнітного поля в районі розташування магнітної обсерваторії або магнітного спостережного пункту.

Метою даної роботи є побудова прогнозних моделей всіх трьох декартових компонентів вектора напруженості геомагнітного поля на одній магнітній обсерваторії. Проведений пошук не виявив робіт, в яких би описувалось рішення поставленої задачі. Це дає підстави вважати, що така задача ставиться та розв'язується вперше у світовій практиці.

Метод регресійного моделювання. Для отримання прогнозних моделей локальних геомагнітних збурень ми застосували метод регресійного аналізу [11], що базується на регресійному та дисперсійному аналізі [6], з деякими модифікаціями, описаними нижче. Раніше цей метод був застосований для прогнозування планетарних геомагнітних індексів [10, 11], зокрема на його основі було розроблено оперативний сервіс прогнозування геомагнітних індексів D_{st} і K_p [4]. Повний опис методу наведено у роботі [11]; тут ми наводимо лише основні його риси.

В рамках цього методу прогнозні значення y^* вихідної величини у шукаються у вигляді часткової множинної регресії [11]:

$$y^*(T + \theta) = \sum_i C_i x_i(T), \quad (1)$$

де T — поточний момент часу, θ — глибина прогнозу, C_i — коефіцієнти регресії, x_i — регресори, які є деякими комбінаціями вхідних величин u . В даній роботі регресори були членами поліному Колмогорова — Габора від вхідних величин з затримками l :

$$x_i(t) = \prod_{k=1}^K u_k^{p_k}(t-l), \quad l = \overline{0, L}. \quad (2)$$

де K — кількість вхідних величин, p_k — показники ступеня з обмеженою сумою, L — глибина пам'яті моделі (максимальний лаг).

Вибір саме такої форми регресорів обумовлений такими міркуваннями. Геомагнітні бурі є наслідком нелінійних фізичних процесів у геокосмосі з дуже різними часовими масштабами — від десятків хвилин до декількох діб. Тому для коректного описання цих процесів у моделі має бути, з одного боку, часове розділення, що відповідає найменшим часовим масштабам чи принаймні часовим масштабам найсильніших за проявами процесів, а з іншого — враховувати фазу процесів з більшими часовими масштабами. Це досягається використанням затримок вхідних величин.

Структурна ідентифікація моделей провадиться методом дисперсійного аналізу з використанням критерію Фішера (F -тест) [6, 5]. Для підвищення стійкості моделей та запобігання проблеми оверфітінгу сформований вхідний масив даних розділяється на навчальну, тестову та екзаменаційну вибірки. На навчальній вибірці регресори як додаються, так і відкидаються, а на тестовій — лише відкидаються.

Параметрична ідентифікація моделей провадиться узагальненим методом найменших квадратів на екзаменаційній вибірці з однаковими статистичними вагами всіх точок. У роботі [11] для отримання параметричної ідентифікації використовувався метод нормованих рівнянь з використанням алгоритму Гаусса — Жордана. В цій роботі ми використовуємо варіант алгоритму параметричної ідентифікації, заснований на методі розкладу за сингулярними значеннями (SVD), див. [13]. Це дозволяє уникнути помилкового відкидання значущих регресорів в ситуації, коли інформаційна матриця системи близька до виродженої. Відкидання суттєвих регресорів при використанні алгоритму Гаусса — Жордана було обумовлене тим, що при параметричній ідентифікації виникають пари регресорів, кожний з яких несуттєвий, та відкидання одного з них не впливало на точність побудованої моделі. Відкидання ж обох регресорів мало значний вплив на точність прогнозу, отриманого за допомогою моделі. Крім того, процедура є значно швидшою за використання методу нормалізованих рівнянь з перевіркою значимості груп регресорів і дозволяє скоротити час побудови моделі з декіль-

кох діб до декількох годин. Точність отриманих моделей при цьому залишалась на тому ж або вищому рівні. При цьому метод SVD застосовувався до матриці Фішера, а не до інформаційної матриці.

Результатом застосування цього методу є прогностичні моделі для вихідної величини. З точки зору теорії керування, ці моделі належать до класу чорної скриньки з багатьма входами, одним виходом та зворотним зв'язком. З точки зору теорії систем ці моделі належать до класу NARX, тобто містять авторегресійну частину, зовнішні входи та їхні нелінійні комбінації [7]. З точки зору математичної статистики ці моделі належать до лінійних часткових множинних немарківських регресійних моделей.

Окрім очевидного застосування для прогнозування вихідної величини, структура та параметри таких моделей можуть дати корисну інформацію про фізичні процеси у досліджуваній системі [10, 12].

Використані дані. Для створення вхідного масиву даних було використано базу даних OMNI 2 [8, 3], яка містить дані значень міжпланетного магнітного поля, сонячного вітру та геомагнітних індексів, усереднені за одногодинними інтервалами, починаючи з 1 січня 1963 р. Дані до 1976 р. були відкинуті через несистематичний характер вимірювань. З усього масиву даних були використані тільки ті параметри, значення яких доступні в реальному часі.

Як вихідні дані використано значення геомагнітних елементів X , Y та Z для магнітної обсерваторії «Львів» Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України (код IAGA: LVV) за той самий період часу з однохвилинним та одногодинним часовим розділенням. Дані були отримані з міжнародної мережі INTERMAGNET, а також з всесвітнього центру даних з геомагнетизму в Кіото. Дані з однохвилинним часовим розділенням також були приведені до одногодинного часового розділення шляхом усереднення [14] для подальшого опрацювання та формування відповідних вибірок.

Також використовувались синтетичні вхідні величини, що дорівнювали синусам та косинусам з періодами у 1 добу та 1 рік. Таким чином,

загальна кількість вхідних величин для кожної моделі становила 12.

Сформований масив даних був розділений на три вибірки: навчальну (1976—2000 рр.), тестову (2001—2009 рр.) та екзаменаційну (2009—2018 рр.) з приблизно рівною кількістю точок.

Опис методики. Описаний вище метод був реалізований у вигляді двох програмних модулів, один з яких здійснює автоматичне налаштування моделей на навчальній та тестовій вибірках, а другий — валідацію отриманих моделей на екзаменаційній вибірці.

При налаштуванні моделей були обрані такі граничні рівні статистичної значимості регресорів: 0.1 для навчальної вибірки та 0.05 для тестової вибірки. Моделі будувалися для кожного з геомагнітних елементів незалежно. Глибина пам'яті складала 24 години для параметрів сонячного вітру та 27 днів для геомагнітних даних.

При валідації моделей використовувались такі характеристики:

— ефективність прогнозування PE :

$$PE = \frac{1 - RMS^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

(RMS — середнє квадратичне відхилення прогнозу, σ — стандартне відхилення вибірки);

— коефіцієнт r лінійної кореляції Пірсона між вимірним і прогнозним значенням (LC);

— параметр «skill score»:

$$SS = \frac{S_{for} - S_{ref}}{S_{perfor} - S_{ref}}, \quad (4)$$

де S — певна характеристика (в нашому випадку — СКВ) для різних моделей, індекси for, ref, perfor (forecast, reference, perfect forecast) вказують відповідно на прогнозну, референтну та ідеальну моделі; за ідеальний прогноз використовувалися істинні значення вихідної величини, а за референтний — ті ж значення, зсунуті назад у часі на глибину прогнозу (т. зв. *persistence model*).

Для референтної моделі також розраховувалися характеристики PE та LC . Більш детальний опис цих та інших характеристик прогнозу див. веб-сторінку [1].

Крім того, для найсильніших геомагнітних бур, що потрапляли у екзаменаційну вибірку,

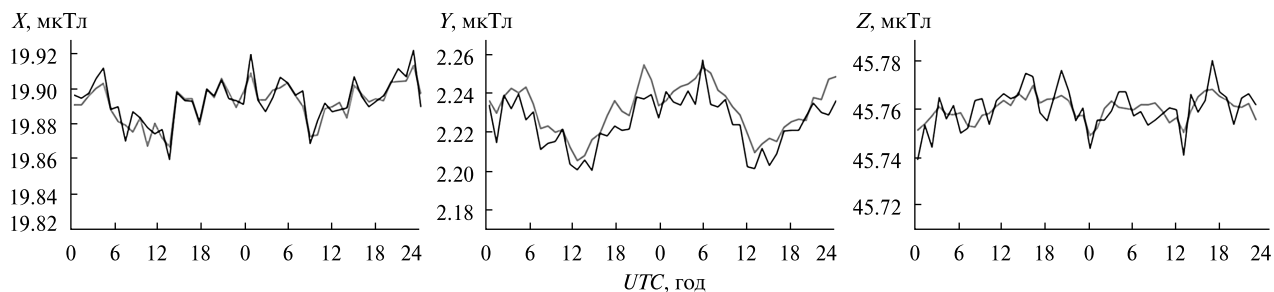


Рис. 1. Приклад прогнозів геомагнітних елементів X , Y , Z на магнітній обсерваторії «Львів» з глибиною прогнозування 3 години в спокійних умовах 23—24.07.2017 р. Чорна лінія — прогноз, сіра лінія — вимірювання

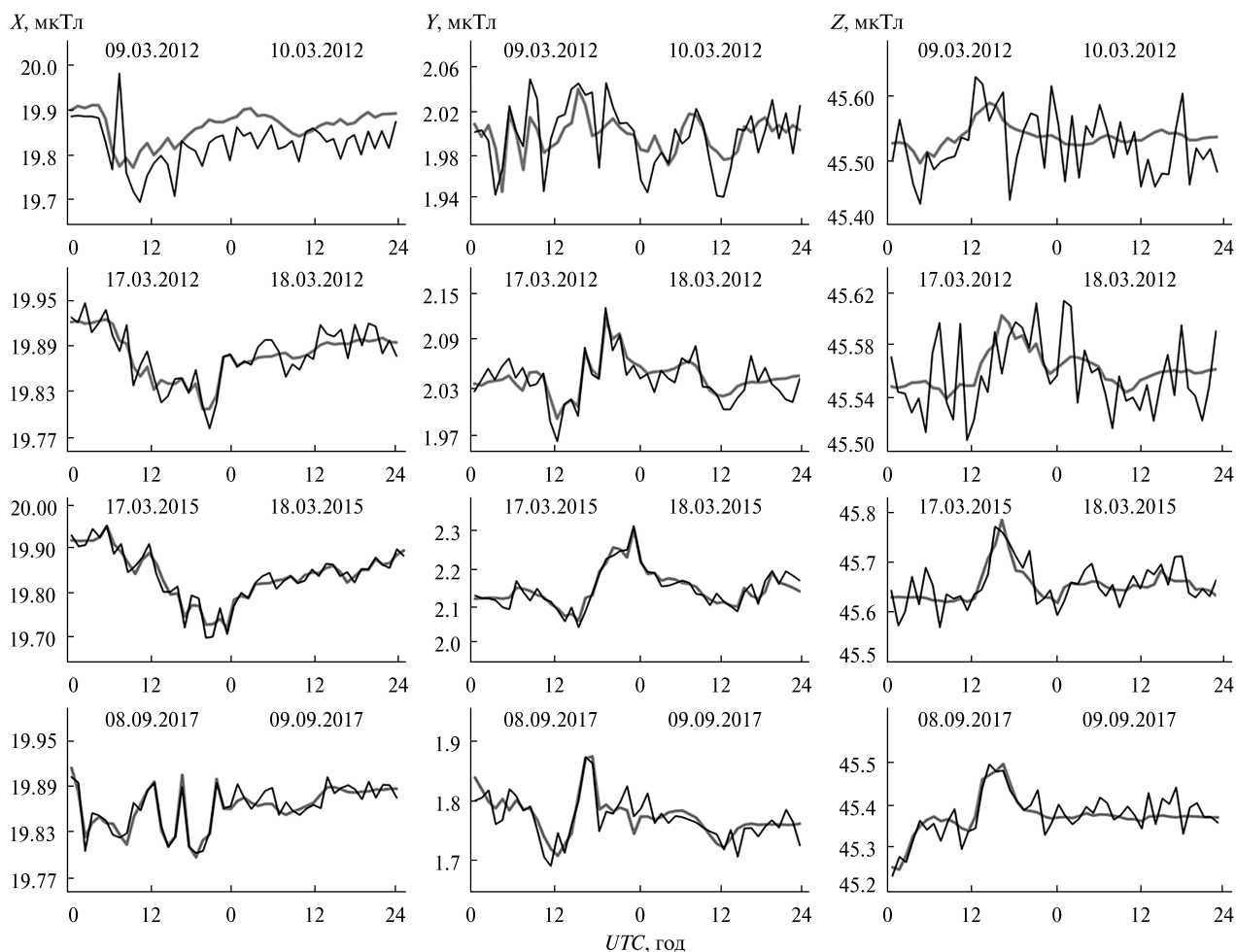


Рис. 2. Результати прогнозування геомагнітних елементів X , Y , Z на магнітній обсерваторії «Львів» з глибиною прогнозування 3 год під час чотирьох геомагнітних бур (09—10.03.2012 р., 17—18.03.2013 р., 17—18.03.2015 р., 08—09.09.2017 р.). Чорна лінія — прогноз, сіра лінія — вимірювання

здійснювалось візуальне порівняння прогнозованих значень з виміряними.

Результати прогнозування. В результаті отримано моделі для прогнозування значень компонентів локального магнітного поля з глибиною прогнозу 3 год. Через велику розмірність та немарківську динаміку системи кількість регресорів в цих моделях є достатньо великою: 387 для X , 368 для Y та 326 для Z . Тому ми не наводимо повний перелік регресорів через недоцільність. Статистичні характеристики отриманих моделей наведено у таблиці.

Приклад прогнозів отриманих моделей та їхнє порівняння з реально виміряними значеннями у спокійних умовах та під час геомагнітних бур наведено на рис. 1 та 2 відповідно.

Обговорення отриманих результатів. Отримані позитивні значення *skill score* дозволяють казати про те, що поставленої мети в цілому досягнуто. Натомість аналогічні моделі для прогнозування геомагнітного індексу D_{st} з такою ж глибиною [10, 7] демонструють суттєво більші значення цієї характеристики. Аналогічна картина спостерігається також з ефективністю прогнозування та коефіцієнтом кореляції: для магнітної обсерваторії «Львів» вони становлять близько 80 %, а для індексу D_{st} — близько 90 %. На нашу думку, це може пояснюватися або значним неврахованим внеском локальних джерел магнітного поля, насамперед техногенного характеру, або тим, що дані в навчальній та екзаменаційній вибірці були отримані на різному обладнанні (з 1970 до 2002 року використовувався аналоговий магнітометр Боброва з системою координат HDZF, з 2002 — цифрові варіометри PSM-8911 та LEMI-025 з системою координат XYZF). Для прояснення даного питання ми продовжимо дослідження для більшої кількості магнітних обсерваторій.

В ході попередніх досліджень було встановлено, що використання масиву даних, який покриває лише один цикл сонячної активності за плямами (11 років), не дозволяє отримати прогнози з додатним значенням *skill score*. Логічно допустити, що мінімальний обсяг масиву даних має становити 22 роки (один цикл сонячної активності за магнітним полем), але в даному дослідженні це прямо не перевірялося.

Візуальний аналіз прогнозів під час найсильніших геомагнітних бур (див. рис. 2) показує, що отримані прогнозні моделі видають правильні оцінки трьох найважливіших характеристик бур: часу початку та амплітуди головної фази та тривалості фази відновлення у компонентах X та Y .

Деякі більші похибки у визначенні компонента Z потребують додаткових досліджень.

Єдиною подією, для якої отримано прогноз належної якості, була буря 09-10.03.2012. Причиною цього були некоректні значення швидкості сонячного вітру за даними приладу SWEPAM на борту КА ACE, які становили менше 300 км/с, тоді як за даними протонного монітору у складі приладу CELIAS на борту КА SOHO та приладу MTOF на борту КА WIND вона перевищувала 800 км/с. Причини некоректної роботи приладу SWEPAM під час даної події обговорюються в роботі [9].

Висновки. В результаті проведеної роботи вперше у світовій практиці вдалося отримати прогнозні моделі локальних геомагнітних збурень. Розроблені моделі мають такі властивості:

- обсерваторія: LVV;
- прогнозовані величини: XYZ;
- глибина прогнозу: 3 год;
- ефективність прогнозування: 0.816 (X), 0.803(Y), 0.801 (Z);
- коефіцієнти кореляції з усередненими даними вимірювань: 0.824 (X), 0.811(Y), 0.804 (Z);

Статистичні характеристики (ефективність прогнозування PE , коефіцієнт лінійної кореляції r та *skill score*) отриманих прогнозних моделей на екзаменаційній вибірці

Елемент	$PE, \%$		$r, \%$		$SS, \%$
	прогнозна модель	референтна модель	прогнозна модель	референтна модель	
$LVVX$	81.6	68.6	82.4	70.1	11.5
$LVVY$	80.3	63.4	81.1	70.7	9.5
$LVVZ$	80.1	60.2	80.4	68.9	9.9

- skill score: 0.115 (X), 0.095 (Y), 0.099 (Z);
- середня ефективність прогнозування: 0.8;
- середній коефіцієнт кореляції: 0.8;
- середнє значення *skill score*: 0.1;

Розроблені моделі пройшли апробацію у Головному центрі спеціального контролю і були визнані такими, що задовольняють основним вимогам до оперативних прогнозних моделей:

- використовують лише дані, які доступні, або реалістично можуть бути отримані у масштабі часу, наближеному до реального;
- забезпечують підвищення точності прогнозування (зменшення СКВ) порівняно з референтною моделлю типу persistence;
- можуть застосовуватися у повністю автоматичному режимі;
- можуть переноситися на інші магнітні пункти спостереження без зміни методики.

Крім того, структура та параметри отриманих моделей можуть дати нову інформацію про локальну динаміку геомагнітних збурень.

Автори вдячні *Space Physics Data Facility (SPDF) та National Space Science Data Center (NSSDC)* за безкоштовний онлайн-каталог *OMNI2*. Дані *OMNI* були отримані з інтерфейсу *GSFC / SPDF OMNIWeb* [3, 8].

Результати, представлені в даній роботі, спираються на дані, зібрані на магнітних обсерваторіях. Авторі висловлюють подяку Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, персоналу геомагнітної обсерваторії «Львів», *INTERMAGNET* за просування високих стандартів магнітної обсерваторії [2] та всесвітньому центру даних з геомагнетизму, Кіото [4].

Автори висловлюють окрему подяку директору магнітної обсерваторії «Львів» Юрію Петровичу Сумаруку за надані дані та цінне обговорення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сайт Forecast verification methods URL: <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/> (дата звернення 09.09.2019).
2. Сайт International Real-time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET) URL: <http://www.intermagnet.org> (дата звернення 09.09.2019).
3. Сайт OMNIWeb. URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html (дата звернення 09.09.2019).
4. Сайт всесвітнього центру даних з геомагнетизму Кіото. URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> (дата звернення 09.09.2019).
5. Фишер Р. А. *Статистические методы для исследователей*. Москва: Госстатиздат, 1958. 133 с.
6. Худсон Д. *Статистика для физиков. Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике*. Москва: Мир, 1970. 297 с.
7. Billings S. A. *Nonlinear system identification*. Wiley, 2013. 597 p.
8. King J. H., Papitashvili N. E. Solar Wind Spatial Scales in Comparisons of Hourly Wind and ACE Plasma and Magnetic Field Data. *J. Geophys. Res.* 2004. **110**. A02209. DOI:10.1029/2004JA010804.
9. Machol J. L., Reinard A. A., Viereck R. A., Biesecker D. A. Identification and replacement of proton-contaminated real-time ACE solar wind measurements. *Space Weather*. 2013. **11**, № 7. P. 434–440. DOI:10.1002/swe.20070.
10. Parnowski A. S. Regression modeling method of space weather prediction. *Astrophys. and Space Sci.* 2009. **323**, № 2. P. 169–180. DOI:10.1007/s10509-009-0060-4 [arXiv:0906.3271].
11. Parnowski A. S. Regression modelling of geomagnetic activity. *J. Phys. Studies*. 2011. **15**, № 2. 2002.
12. Parnowski A. S., Polonska A. Yu Regression modelling of the interaction between the solar wind and the terrestrial magnetosphere. *J. Phys. Studies*. 2012. **16**, № 1/2. 1002.
13. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. *Numerical Recipes in FORTRAN. The Art of Scientific Computing [Text]* 2nd Ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992.
14. Reay S., Herzog D., Alex S., Kharin E., McLean S., Nosé M., et al. Magnetic Observatory Data and Metadata: Types and Availability. *Geomagnetic Observations and Models*. 2011. P. 149–181.
15. Semeniv O., Polonska A., Parnowski A. Operational geomagnetic forecast service. *Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка*. Сер. Астрономія. 2014. № 51. С. 23–24.
16. Sumaruk T., Sumaruk Yu. The New Index of Geomagnetic Activity. *Publ. Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences*. Monographic volume C-99(398). 2007. P. 374–382.

Стаття надійшла до редакції 09.09.2019

REFERENCES

1. Forecast verification methods. URL: <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/> (Last accessed: 09.09.2019).
2. International Real-time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET). URL <http://www.intermagnet.org> (Last accessed: 09.09.2019).
3. OMNIWeb online database. URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html (Last accessed: 09.09.2019).
4. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> (Last accessed: 09.09.2019).
5. Fisher R. A. (1954). *Statistical methods for research workers*. London: Oliver and Boyd.
6. Hudson D. (1964). *Statistics lectures on elementary statistics and probability*. Geneva.
7. Billings S. A. (2013). *Nonlinear system identification*. Wiley.
8. King J. H., Papitashvili N. E. (2004). Solar Wind Spatial Scales in Comparisons of Hourly Wind and ACE Plasma and Magnetic Field Data. *J. Geophys. Res.*, **110**, A02209. DOI:10.1029/2004JA010804.
9. Machol J. L., Reinard A. A., Viereck R. A., Biesecker D. A. (2013). Identification and replacement of proton-contaminated real-time ACE solar wind measurements. *Space Weather*, **11**, № 7, 434—440. DOI:10.1002/swe.20070.
10. Parnowski A. S. (2009). Regression modeling method of space weather prediction. *Astrophys. and Space Sci.*, **323**, № 2, 169—180. DOI:10.1007/s10509-009-0060-4 [arXiv:0906.3271].
11. Parnowski A. S. (2011). Regression modelling of geomagnetic activity. *J. Phys. Studies*, **15**, № 2, 2002.
12. Parnowski A. S., Polonska A. Yu. (2012). Regression modelling of the interaction between the solar wind and the terrestrial magnetosphere. *J. Phys. Studies*, **16**, № 1/2, 1002.
13. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. (1992). *Numerical Recipes in FORTRAN. The Art of Scientific Computing*. 2nd Ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
14. Reay S., Herzog D., Alex S., Kharin E., McLean S., Nosé M., et al. (2011). Magnetic Observatory Data and Metadata: Types and Availability. *Geomagnetic Observations and Model*, 149—181.
15. Semenov O., Polonska A., Parnowski A. (2014). Operational geomagnetic forecast service. *Bull. Taras Shevchenko Nat. Univ. Kyiv. Ser. Astronomy*, № 51, 23—24.
16. Sumaruk T, Sumaruk Yu. (2007). The New Index of Geomagnetic Activity. *Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences*. Monographic volume C-99(398), 374—382.

Received 09.09.2019

D. Vlasov¹, Leading Engineer

E-mail: dima.i.vlasov@gmail.com

A. Parnowski^{1,2}, Senior Researcher, Cand. Sci. in Phys. & Math.

¹ Space Research Institute National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine

40 Glushkova Ave., build. 4/1, Kyiv, 03187 Ukraine

² Main Center of Special Monitoring

1 Kosmichna Str., Gorodok, Radomyshl District, Zhytomyr Region, 12265 Ukraine

PREDICTION OF LOCAL GEOMAGNETIC ACTIVITY FROM DATA OF “LVIV” MAGNETIC OBSERVATORY

For the first time in world practice, the predictive models were constructed for X , Y , Z geomagnetic elements. Based on these models, the prediction was made with 3 hours lead time using data of the “Lviv” magnetic observatory. The properties of models are as follows: observatory — LVV, predicted values — XYZ ; lead time — 3 hours; correlation coefficients’ averaged measurement data — 0.824 (X), 0.811 (Y), 0.804 (Z); prediction efficiency — 0.816 (X), 0.803 (Y), 0.801 (Z); skill score — 0.115 (X), 0.095 (Y), 0.099 (Z). The developed models were tested at the Main Center of Special Monitoring, and they were found to meet the Basic Requirements for operational predictive models.

Keywords: space weather, local geomagnetic activity, regression modeling.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.01.085>
УДК 533.9

Д. О. РЕДЧИЦЬ¹, зав. відділу, д-р фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.,
лауреат премії ім. М. К. Янгеля НАН України (2019 р.)

E-mail: redchits_da@ua.fm

С. В. МОІСЕЄНКО², доцент, канд. техн. наук, доцент

¹ Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України
вул. Писаржевського 5, Дніпро, Україна, 49005

² Херсонський національний технічний університет
вул. Бериславське шосе 24, Херсон, Україна, 73008

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПОТОКІВ ХОЛОДНОЇ ПЛАЗМИ ПРИ РОБОТІ ПЛАЗМОВОГО АКТУАТОРА

В роботі розглядається чисельне моделювання нестационарних потоків холодної плазми. Низькотемпературна нерівноважна ідеальна плазма формується при взаємодії плазмового актуатора з повітряним середовищем. Для опису поведінки низькотемпературної плазми розроблено математичну модель, яка базується на нестационарних рівняннях, що описують динаміку заряджених частинок, і рівняннях електродинаміки плазми. В роботі розглядається 14 видів частинок: метастабільні і збуджені атоми азоту і кисню, позитивні і негативні іони, електрони і атомарний кисень. Розглянуто об'ємні та поверхневі хімічні реакції, котрі описують процеси у бар'єрному розряді, що протікають над поверхнею діелектрика. Для нестационарних рівнянь динаміки плазми розроблено неявний чисельний алгоритм з підітераціями за псевдочасом, який базується на скінченно-об'ємному підході. Рівняння для електростатичного потенціалу з джерельними членами розв'язувались за допомогою методу мінімізації узагальненої нев'язки з неповним LU-передзумовлюванням. В нестационарних рівняннях для щільності частинок плазми апроксимація дрейфових похідних здійснювалася за допомогою схеми TVD з функцією-обмежувачем MinMod. Похідні в рівнянні для електричного потенціалу розраховувались за допомогою скінченно-об'ємних співвідношень з урахуванням протипотокової апроксимації значень концентрації заряджених частинок плазми. Отримано чисельні результати зародження, розвитку та руйнування стримера при діелектричному бар'єрному розряді. Проаналізовано нестационарні характеристики плазми в області над діелектричною поверхнею, включаючи розподіл щільності частинок, електричного потенціалу та складових сили Лоренца. Результати чисельного моделювання нестационарних потоків низькотемпературної плазми добре узгоджуються з наявними експериментальними даними.

Ключові слова: холодна плазма, математичне моделювання, чисельні методи, плазмовий актуатор.

ВСТУП

На сьогоднішній день холодна плазма набула широкого поширення в аерокосмічній техніці, плазмових дисплеях, системах очищення повітря, косметології, медицині тощо. Одним із застосувань холодної плазми є керування структурою течії. Застосування плазмових актуаторів

(ПА) на основі діелектричного бар'єрного розряду (ДБР) належить до сучасних і перспективних засобів зміни структури течії [3].

Удосконалення сучасних конструкцій плазмових актуаторів та їхньої роботи на основі діелектричного бар'єрного розряду вимагає повного аналізу всієї сукупності фізико-хімічних проце-

Цитування: Редчиць Д. О., Моїсеєнко С. В. Чисельне моделювання нестационарних потоків холодної плазми при роботі плазмового актуатора. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 1 (128). С. 85—96. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.085>

сів, включаючи як макроскопічні характеристики ДБР, так і структуру окремого мікророзряду, а також склад продуктів плазмохімічних реакцій [6].

Відомі математичні моделі динаміки частково іонізованого потоку спираються на емпіричні константи і придатні тільки для окремих класів течій. Розробка моделі для опису процесів, досліджуваних у широкому діапазоні визначальних параметрів, є актуальною і поки що не розв'язаною задачею у даній області знань.

Як показує практика, для створення математичної моделі недостатньо просто виписати диференціальні рівняння, що описують конкретні фізичні процеси. Єдина система, яка описує різноманітні фізико-хімічні процеси стикається з проблемою неузгодженості за характерними часами і швидкостями, різноманітністю протікання фізичних процесів, таких як дифузія, адвекція, іонізація, рекомбінація, та їхнім математичним описом.

Однією з головних проблем є відмінність масштабів за часом протікання нелінійних фізичних процесів. Так, занадто дрібний крок інтегрування знижує загальну працездатність на 2-3 порядки. Процеси, що призводять до дрібних кроків за часом (наприклад, зародження стримера) найчастіше бувають локальними, тобто відбуваються не протягом всього циклу, а у порівняно невеликий його період. Використання традиційних чисельних методів пов'язано з надзвичайно великими і часто нераціональними витратами процесорного часу, що, в свою чергу, веде до неможливості проведення обчислювального експерименту.

У зв'язку з цим є сенс розширити поняття концепції математичної моделі до чисельно-аналітичної. Аналітична частина є системою вихідних рівнянь, граничних умов, оцінок адекватності описуваних фізичних процесів. Чисельна сторона математичної моделі пов'язана, у першу чергу, із забезпеченням працездатності спеціалізованого пакета програм. Мова йде не стільки про добре відомі числові алгоритми розв'язку окремих рівнянь або систем рівнянь, скільки про ті додаткові заходи, що забезпечують взаємну працездатність різних аспектів загальної математичної моделі. Такі додаткові заходи чи-

сельного та алгоритмічного характеру необхідно розглядати як невід'ємну частину загальної чисельно-аналітичної моделі.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ, ДИНАМІКИ ТА ХІМІЧНОЇ КІНЕТИКИ ПЛАЗМИ

Для опису просторово-часової структури діелектричного бар'єрного розряду в повітрі за базовий обрано дифузійно-дрейфовий підхід [2, 7, 9].

1.1. Кінетична схема плазми діелектричного бар'єрного розряду. Як робочий газ виступає повітря з фіксованою часткою азоту $N_2/N_{air} = 0.78$ та кисню $O_2/N_{air} = 0.22$ при нормальному тиску $p = 101325 \text{ Н/м}^2$ (1 атм) на рівні моря. Температура повітря приймається сталою і рівною $T = 300 \text{ К}$. Загальна кількість молекул азоту й кисню в одиниці об'єму становить $N_{air} = 2.447 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

В роботі розглядаються електронно-збуджені та метастабільні (*) стани молекул азоту $N_2^*(A^3\Sigma_u^+)$, $N_2^*(B^3\Pi_g)$, $N_2^*(a^1\Sigma)$, $N_2^*(C^3\Pi_u)$ і кисню $O_2^*(a^1\Delta_g)$, $O_2^*(b^1\Sigma_g^+)$, атоми кисню O , електрони e , а також позитивні N_2^+ , N_4^+ , O_2^+ , O_4^+ і негативні іони O^- , O_2^- , у цілому 14 частинок і 97 плазмохімічних реакцій, включаючи поверхневі процеси.

Хімічні реакції включають процеси дисоціації, іонізації молекул електронним ударом з основного стану, ступінчасту, асоціативну і фотоіонізацію, збудження молекул, іонізацію збуджених (метастабільних) молекул, прилипання і відлипання електронів, рекомбінацію електронів і позитивних іонів, хімічні перетворення нейтральних атомів, молекул та іонів, а також процеси вторинної емісії електронів з відкритого електрода і діелектричної поверхні.

Температура, рухливість і дифузія електронів, а також коефіцієнти деяких хімічних реакцій (іонізації, збудження, прилипання) залежать від напруженості електричного поля і розраховуються за допомогою солвера BOLSIG+ [8], призначеного для розв'язування рівняння Больцмана з використанням функції розподілу електронів за швидкостями та енергіями.

1.2. Рівняння електродинаміки плазми. У загальному випадку плазма може бути описана чотирма рівняннями Максвелла у вигляді

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho_c, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{B} / \partial t, \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t, \end{aligned} \quad (1)$$

де \mathbf{H} — напруженість магнітного поля, \mathbf{B} — магнітна індукція, \mathbf{E} — напруженість електричного поля, \mathbf{D} — електрична індукція, \mathbf{j} — щільність електричного струму, $\rho_c = e(n_+ - n_-)$ — щільність сумарного об'ємного заряду, e — елементарний заряд, n_+ , n_- — об'ємна щільність позитивних і негативних часток. Рівняння (1) — це математичний запис закону Гауса, закону Гауса для магнітного поля, закону Фарадея та закону Ампера — Максвелла відповідно.

Закони Фарадея і Гауса для магнітної індукції виконуються тотожно, якщо електричні й магнітні поля виразити через скалярний (φ) і векторний (\mathbf{A}) потенціали

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi - \partial \mathbf{A} / \partial t, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (2)$$

Вектор електричної індукції \mathbf{D} пов'язаний з вектором напруженості електричного поля \mathbf{E} через абсолютну діелектричну проникність $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ і дорівнює $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$, де ε_r — відносна діелектрична проникність середовища, ε_0 — електрична стала.

Оскільки швидкості руху заряджених часток у плазмі набагато менші, ніж релятивістські швидкості, а зовнішніх джерел магнітного поля немає, то напруженість магнітного поля \mathbf{H} і магнітна індукція \mathbf{B} покладаються рівними нулю. Тоді $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$, і закон Гауса з урахуванням поверхневого заряду σ набуде вигляду

$$\nabla(\varepsilon_r \nabla \varphi) = -\rho_c / \varepsilon_0 - \sigma \delta(h) / \varepsilon_0, \quad (3)$$

де δ — дельта-функція Дірака, h — відстань по нормалі до поверхні діелектрика, σ — сумарна поверхнева щільність електричного заряду. Рівняння (3) є рівнянням Пуассона для електричного поля. Щільність сумарного заряду у будь-якій точці плазми визначається як різниця між щільністю позитивного та негативного заряду. Отже, можна записати

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla \varphi) &= -e(n_{N_4^+} + n_{N_2^+} + n_{O_4^+} + n_{O_2^+} - \\ &- n_{O_2^-} - n_{O^-} - n_e) / \varepsilon_0 - (\sigma_+ - \sigma_-) \delta / \varepsilon_0, \end{aligned} \quad (4)$$

де σ_+ , σ_- — поверхнева щільність позитивного та негативного зарядів, $n_{N_4^+}$, $n_{N_2^+}$, $n_{O_4^+}$, $n_{O_2^+}$, $n_{O_2^-}$,

n_{O^-} , n_e — об'ємна щільність електронів, а також позитивних і негативних іонів азоту та кисню.

1.3. Рівняння динаміки часток плазми в дифузійно-дрейфовому наближенні. Виходячи з кінетичної схеми діелектричного бар'єрного розряду, можна скласти рівняння динаміки для кожного сорту часток. Систему рівнянь динаміки часток плазми в дифузійно-дрейфовому формулюванні [9] з урахуванням того, що $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$, можна записати у декартовій формі:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial t} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \mathbf{n} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \mathbf{n} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \right] - \\ - \left[\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{D} \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{D} \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial y} \right] = \mathbf{S}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mathbf{n} = [n_{N_4^+}, n_{N_2^+}, n_{N_2(A^3\Sigma_u^+)}, n_{N_2(B^3\Pi_g)},$$

$$n_{N_2(A^1\Sigma_u^-)}, n_{N_2(C^3\Pi_u)}, n_{O_4^+}, n_{O_2^+}, n_{O_2^-}, n_{O^-}, n_{O}, n_{O_2(A^1\Delta_g)}, n_{O_2(b^1\Sigma_g^+)}, n_e]^T, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mu = [\mu_{N_4^+}, \mu_{N_2^+}, 0, 0, 0, 0, \mu_{O_4^+}, \mu_{O_2^+}, \\ -\mu_{O_2^-}, -\mu_{O^-}, 0, 0, 0, -\mu_e]^T, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mu \mathbf{n} = [\mu_1 n_1, \mu_2 n_2, \dots, \mu_\ell n_\ell]^T,$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D} = [D_{N_4^+}, D_{N_2^+}, 0, 0, 0, 0, D_{O_4^+}, D_{O_2^+}, \\ D_{O_2^-}, D_{O^-}, 0, 0, 0, D_e]^T, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\mathbf{S} = [S_{N_4^+}, S_{N_2^+}, S_{N_2(A^3\Sigma_u^+)}, S_{N_2(B^3\Pi_g)},$$

$$S_{N_2(A^1\Sigma_u^-)}, S_{N_2(C^3\Pi_u)}, S_{O_4^+}, S_{O_2^+}, S_{O_2^-}, S_{O^-}, S_{O}, S_{O_2(A^1\Delta_g)}, S_{O_2(b^1\Sigma_g^+)}, S_e]^T. \quad (9)$$

Тут \mathbf{n} — вектор шуканих змінних для об'ємної щільності частинок, μ і \mathbf{D} — векторні коефіцієнти рухливості та дифузії частинок, \mathbf{S} — вектор джерельних членів.

Компоненти вектора джерельних членів \mathbf{S} у виразі формуються виходячи з кінетичної схеми діелектричного бар'єрного розряду і відповідають за джерела та стоки певного сорту частинок. Принцип формування джерельних членів, опис об'ємних, поверхневих хімічних реакцій та їхніх коефіцієнтів, а також значення коефіцієнтів пе-

реносу (рухливості та дифузії) позитивних і негативних іонів наведено в роботі [2, 9].

1.4. Рівняння балансу поверхневої щільності позитивного й негативного зарядів. Процеси на поверхні діелектрика відіграють істотну роль у роботі плазмового актуатора.

Рівняння балансу поверхневої щільності позитивного та негативного заряду визначається з виразів

$$\begin{aligned} \partial\sigma_+ / \partial t &= -e(1 + \gamma_{diel})\Gamma_{i+} - \alpha_{rw}\sigma_+\sigma_- / e, \\ \partial\sigma_- / \partial t &= -e\Gamma_{i-} - e\Gamma_e - \alpha_{rw}\sigma_+\sigma_- / e, \end{aligned}$$

де Γ_{i+} , Γ_{i-} , Γ_e — потік позитивних, негативних іонів та електронів по нормалі до поверхні, що визначається за типом граничних умов (табл. 1), σ_+ , σ_- — поверхнева щільність позитивного й негативного зарядів, α_{rw} — коефіцієнт поверхневої рекомбінації, $\gamma_{diel} = 0.005$ — коефіцієнт іонно-електронної емісії з діелектрика. Коефіцієнт поверхневої рекомбінації α_{rw} визначається поверхневою дифузиею електронів

$$\alpha_{rw} = d_r \sqrt{\pi k_b T_w / m_e}, \quad (10)$$

де $d_r = 10^{-9}$ м — радіус рекомбінації (величина, що характеризує двовимірні зіткнення, аналогічна ефективному перерізу зіткнень для тривимірного випадку), T_w — температура діелектричної поверхні, m_e , T_e — маса й температура електронів, k_b — константа Больцмана.

1.5. Початкові і граничні умови для вихідної системи рівнянь. Рівняння Пуассона для електричного потенціалу. Як початкові умови для рівняння Пуассона задавався нульовий розподіл елект-

ричного потенціалу в області. Змінну напругу, прикладену до відкритого електрода, задаємо у вигляді

$$\varphi_{el}(t) = \varphi^{\max} \sin(2\pi\omega t), \quad (11)$$

де ω — частота, φ^{\max} — амплітуда коливань. До ізолюваного електрода прикладається нульовий потенціал. На зовнішніх границях ставиться умова Неймана $\partial\varphi / \partial\ell_n = 0$.

Рівняння динаміки часток плазми. Як початкові умови для рівняння динаміки заряджених часток плазми задавалася фонові концентрація іонів і електронів у повітрі ($n_+ = 10^9$ м⁻³, $n_- = 10^9$ м⁻³, $n_e = 10^{10}$ м⁻³). Граничні умови для рівнянь динаміки заряджених часток на твердій поверхні наведені в табл. 1, де $V_{i,e}^{th}$ — теплова швидкість руху часток, γ_{Cu} — коефіцієнт іонно-електронної емісії з мідного анода, що залежить від напруженості електричного поля. На зовнішніх границях ставиться умова Неймана $\partial n / \partial\ell_n = 0$.

Теплова швидкість руху часток визначалась за формулою

$$V_{i,e}^{th} = \sqrt{8k_b T_{i,e} / \pi m_{i,e}}, \quad (12)$$

де $m_{i,e}$, $T_{i,e}$ — маса та температура іонів і електронів.

2. ЧИСЕЛЬНИЙ МЕТОД

2.1. Система рівнянь динаміки частинок плазми й електродинаміки в криволінійній системі координат. *Нестационарне формулювання.* Для моделювання діелектричного бар'єрного розряду необхідно спільно розв'язувати систему рівнянь динаміки частинок плазми з рівнянням Пуассона для електричного поля. При розв'язуванні нестационарної задачі динаміки плазми розглядаються різномірні рівняння. Для їхнього узгодження введемо псевдочас τ для кожного рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \tau_n} + \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial t} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \mathbf{n} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \mathbf{n} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \right] - \\ - \left[\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{D} \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{D} \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial y} \right] = \mathbf{S}, \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau_\varphi} + \frac{\partial}{\partial x} \varepsilon_r \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon_r \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \\ = -\frac{e}{\varepsilon_0} (n_+ - n_-) - \frac{\delta}{\varepsilon_0} (\sigma_+ - \sigma_-), \quad (14) \end{aligned}$$

Таблиця 1. Граничні умови для рівнянь динаміки заряджених частинок

Напруженість електричного поля	Потік заряджених частинок
$E_{\ell_n} > 0$	$\Gamma_{i+} = -(1/4)n_{i+}V_{i+}^{th}$, $\Gamma_{i-} = -\mu_{i-}E_n n_{i-} - (1/4)n_{i-}V_{i-}^{th}$, $\Gamma_e = -\mu_e E_n n_e - (1/4)n_e V_e^{th}$
$E_{\ell_n} \leq 0$	$\Gamma_{i+} = \mu_{i+}E_n n_{i+} - (1/4)n_{i+}V_{i+}^{th}$, $\Gamma_{i-} = -(1/4)n_{i-}V_{i-}^{th}$, $\Gamma_e = -\gamma_{Cu, diel} \Gamma_{i+}$

де τ_n і τ_ϕ — псевдочас для рівнянь динаміки частинок плазми та рівняння електричного потенціалу,

$n_+ = n_{N_4^+} + n_{N_2^+} + n_{O_4^+} + n_{O_2^+}$, $n_- = n_{O_2^-} + n_{O^-} + n_e$ — об'ємна щільність позитивних і негативних частинок. Надалі для зручності виведення необхідних рівнянь останній доданок у (14) будемо опускати.

Рівняння динаміки частинок плазми. Будемо розглядати рівняння для щільності частинок \mathbf{n} у дифузійно-дрейфовому наближенні в криволінійній системі координат у вигляді

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{n}}}{\partial \tau_n} + \frac{\partial \hat{\mathbf{n}}}{\partial t} - \frac{\partial \hat{\mathbf{H}}_\xi}{\partial \xi} - \frac{\partial \hat{\mathbf{H}}_\eta}{\partial \eta} - \frac{\partial \hat{\mathbf{D}}_\xi}{\partial \xi} - \frac{\partial \hat{\mathbf{D}}_\eta}{\partial \eta} = \hat{\mathbf{S}}, \quad (15)$$

де $\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{n} / J$, $\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{S} / J$, J — якобіан перетворення координат, $\xi_x, \eta_x, \xi_y, \eta_y$ — метричні коефіцієнти,

$$\hat{\mathbf{H}}_\xi = \frac{\mu \mathbf{n}}{J} \left((\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right),$$

$$\hat{\mathbf{H}}_\eta = \frac{\mu \mathbf{n}}{J} \left((\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right),$$

$$\hat{\mathbf{D}}_\xi = \frac{\mathbf{D}}{J} \left((\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \eta} \right),$$

$$\hat{\mathbf{D}}_\eta = \frac{\mathbf{D}}{J} \left((\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \eta} \right).$$

Доданки $\partial \hat{\mathbf{H}}_\xi / \partial \xi$, $\partial \hat{\mathbf{H}}_\eta / \partial \eta$ відповідають за адвекцію (дрейф) заряджених частинок. Формальна математична апроксимація цих виразів за допомогою симетричних скінченно-різнице-вих співвідношень (як для дифузійних доданків) призводить до втрати фізичного змісту даного оператора як адвекції заряджених частинок. Для збереження фізичного змісту адвекції вводиться несиметрична скінченно-об'ємна апроксимація для ϕ з урахуванням адвекції \mathbf{n} у вигляді

$$\begin{aligned} & \langle \mathbf{n} \rangle_{i+1/2} = \\ & = \begin{cases} \mathbf{n}_i + \Psi_{i+1/2} (\mathbf{n}_{i+1} - \mathbf{n}_i, \mathbf{n}_i - \mathbf{n}_{i-1}), & -(\mu \nabla \phi)_{i+1/2} \geq 0, \\ \mathbf{n}_{i+1} - \Psi_{i+1/2} (\mathbf{n}_{i+2} - \mathbf{n}_{i+1}, \mathbf{n}_{i+1} - \mathbf{n}_i), & -(\mu \nabla \phi)_{i+1/2} < 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

де $\Psi_{i+1/2}$ — обмежувач потоків MinMod другого порядку точності.

Рівняння для електричного потенціалу. Рівняння Пуассона для електричного потенціалу у криволінійній системі координат матиме вигляд

$$\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \tau_\phi} + \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \eta} = -\frac{\hat{\rho}_c}{\epsilon_0}, \quad (17)$$

де

$$\hat{\phi} = \phi / J, \quad \hat{\rho}_c = \rho_c / J,$$

$$\hat{\phi}_\xi = \frac{\epsilon_r}{J} \left[(\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right],$$

$$\hat{\phi}_\eta = \frac{\epsilon_r}{J} \left[(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right].$$

Апроксимація інших похідних для ϕ здійснюється за скінченно-об'ємними співвідношеннями.

2.2. Неявний метод для рівнянь динаміки частинок плазми та електродинаміки. Рівняння динаміки частинок плазми. Розглянемо рівняння (15) на новому тимчасовому шарі

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \hat{\mathbf{n}}^{n+1,m+1}}{\partial \tau_n} + \frac{\partial \hat{\mathbf{n}}^{n+1,m+1}}{\partial t} - \frac{\partial \hat{\mathbf{H}}_\xi^{n+1,m+1}}{\partial \xi} - \frac{\partial \hat{\mathbf{H}}_\eta^{n+1,m+1}}{\partial \eta} - \\ & - \frac{\partial \hat{\mathbf{D}}_\xi^{n+1,m+1}}{\partial \xi} - \frac{\partial \hat{\mathbf{D}}_\eta^{n+1,m+1}}{\partial \eta} = \hat{\mathbf{S}}^{n+1,m+1}, \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} & \frac{(\hat{\mathbf{n}}^{n+1,m+1} - \hat{\mathbf{n}}^{n+1,m})}{\Delta \tau_n} = \hat{\mathbf{R}}^{n+1,m+1} + \hat{\mathbf{S}}^{n+1,m+1} - \\ & - \frac{1.5 \hat{\mathbf{n}}^{n+1,m+1} - 2 \hat{\mathbf{n}}^n + 0.5 \hat{\mathbf{n}}^{n-1}}{\Delta t}, \end{aligned} \quad (18)$$

де

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}^{n+1,m+1} & = \frac{\partial \hat{\mathbf{H}}_\xi^{n+1,m+1}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\mathbf{H}}_\eta^{n+1,m+1}}{\partial \eta} + \\ & + \frac{\partial \hat{\mathbf{D}}_\xi^{n+1,m+1}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\mathbf{D}}_\eta^{n+1,m+1}}{\partial \eta}. \end{aligned} \quad (19)$$

Використаний алгоритм базується на тришаровій неявній схемі з підітераціями за псевдочасом τ_n , другого порядку точності за фізичним часом t .

Лінеаризуємо нев'язку $\hat{\mathbf{R}}^{n+1,m+1}$, джерельний член $\hat{\mathbf{S}}$ і запишемо рівняння у дельта-формі:

$$\begin{aligned} & [(1/(J \Delta \tau_n) + 1.5/(J \Delta t)) \mathbf{E}_{14 \times 14} - (\partial \hat{\mathbf{R}} / \partial \mathbf{n})^{n+1,m} - \\ & - (\partial \hat{\mathbf{S}} / \partial \mathbf{n})^{n+1,m}] \Delta \mathbf{n}^{n+1,m} = \hat{\mathbf{R}}^{n+1,m} + \hat{\mathbf{S}}^{n+1,m} - \\ & - (1.5 \hat{\mathbf{n}}^{n+1,m} - 2 \hat{\mathbf{n}}^n + 0.5 \hat{\mathbf{n}}^{n-1}) / \Delta t, \end{aligned} \quad (20)$$

де $\Delta \mathbf{n}^{n+1,m} = \mathbf{n}^{n+1,m+1} - \mathbf{n}^{n+1,m}$, $\mathbf{E}_{14 \times 14}$ — одинична матриця 14×14 . Лінеаризацію рівняння (18) виконано за псевдочасом.

Рівняння електричного потенціалу з урахуванням рівнянь для щільності заряджених частинок. При розв'язуванні рівняння Пуассона для електричного потенціалу спільно з рівняннями динаміки частинок плазми важливу роль відіграє крок інтегрування за часом. Явне узгодження цих рівнянь накладає обмеження на крок за часом типу $\Delta t \leq \Delta t_{Maxwell}$, де $\Delta t_{Maxwell} = \epsilon_0 / \sum e \mu_k n_k$ — максвеллівський час ($k = i_+, i_-, e$). Максвеллівський час (час релаксації об'ємного заряду) — це характерний час, необхідний зарядженим частинкам для установаження рівноважного стану під дією змінного електричного поля, яке вони ж і змінюють.

Взаємозв'язок рівняння Пуассона з рівняннями динаміки заряджених частинок полягає у розрахунку переносу частинок у сумарному електричному полі, що складається з електричного поля, породженого цими ж зарядженими частинками, і зовнішнього електричного поля.

Розглянемо рівняння (17) на новому часовому шарі $n+1$ для підітерації $m+1$:

$$\frac{\partial \hat{\varphi}^{n+1,m+1}}{\partial \tau_\varphi} + \frac{\partial \hat{\varphi}_\xi^{n+1,m+1}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\varphi}_\eta^{n+1,m+1}}{\partial \eta} = -\frac{e}{\epsilon_0} (\hat{n}_+^{n+1,m+1} - \hat{n}_-^{n+1,m+1}). \quad (21)$$

З розвинення в ряд Тейлора за псевдочасом τ для величин n_+ і n_- отримаємо

$$\hat{n}_\pm^{n+1,m+1} = \hat{n}_\pm^{n+1,m} + \Delta \tau_n (\partial \hat{n}_\pm / \partial \tau_n)^{n+1,m+1} + O(\Delta \tau_n^2), \quad (22)$$

Підставляючи (22) в (21), отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\varphi}^{n+1,m+1}}{\partial \tau_\varphi} + \frac{\partial \hat{\varphi}_\xi^{n+1,m+1}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\varphi}_\eta^{n+1,m+1}}{\partial \eta} = & -\frac{e}{\epsilon_0} (\hat{n}_+^{n+1,m} - \hat{n}_-^{n+1,m}) - \frac{e}{\epsilon_0} \Delta \tau_n \left(\frac{\partial \hat{n}_+}{\partial \tau_n} \right)^{n+1,m+1} + \\ & + \frac{e}{\epsilon_0} \Delta \tau_n \left(\frac{\partial \hat{n}_-}{\partial \tau_n} \right)^{n+1,m+1} + O(\Delta \tau_n^2). \end{aligned} \quad (23)$$

З рівняння (15) маємо

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \hat{n}_\pm}{\partial \tau_n} \right)^{n+1,m+1} = & \left(-\frac{\partial \hat{n}_\pm}{\partial t} + \frac{\partial \hat{H}_{\xi,\pm}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{H}_{\eta,\pm}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{D}_{\xi,\pm}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{D}_{\eta,\pm}}{\partial \eta} + \hat{S}_\pm \right)^{n+1,m+1}, \end{aligned} \quad (24)$$

де

$$L_+ = L_{N_4^+} + L_{N_2^+} + L_{O_4^+} + L_{O_2^+},$$

$$L_- = L_{O_2^-} + L_{O^-} + L_e,$$

$$L = \hat{n}, \hat{H}_\xi, \hat{H}_\eta, \hat{D}_\xi, \hat{D}_\eta, \hat{S}.$$

Підставляючи (24) у (23), отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\varphi}^{n+1,m+1}}{\partial \tau_\varphi} + \frac{\partial \hat{\varphi}_\xi^{n+1,m+1}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\varphi}_\eta^{n+1,m+1}}{\partial \eta} + & \frac{e \Delta \tau_n}{\epsilon_0} \left[\frac{\partial (\hat{H}_{\xi,+} - \hat{H}_{\xi,-})}{\partial \xi} + \frac{\partial (\hat{H}_{\eta,+} - \hat{H}_{\eta,-})}{\partial \eta} \right]^{n+1,m+1} = \\ = -\frac{e}{\epsilon_0} (\hat{n}_+ - \hat{n}_-)^{n+1,m} - \frac{e \Delta \tau_n}{\epsilon_0} \left(-\frac{\partial \hat{n}_+}{\partial t} + \frac{\partial \hat{D}_{\xi,+}}{\partial \xi} + \right. & \\ \left. + \frac{\partial \hat{D}_{\eta,+}}{\partial \eta} + \hat{S}_+ + \frac{\partial \hat{n}_-}{\partial t} - \frac{\partial \hat{D}_{\xi,-}}{\partial \xi} - \frac{\partial \hat{D}_{\eta,-}}{\partial \eta} - \hat{S}_- \right)^{n+1,m+1}. \end{aligned}$$

Якщо в чисельному алгоритмі спочатку розв'язується рівняння відносно φ , а потім рівняння для щільності заряджених частинок n_+ і n_- , то в останньому співвідношенні всі коефіцієнти беруться з попередньої підітерації m . Чисельну апроксимацію похідних $\partial \hat{n}_+ / \partial t$ і $\partial \hat{n}_- / \partial t$ в (24) можна виконати з необхідним порядком точності за Δt . Використання розкладу в ряд Тейлора не накладає обмежень за типом схеми (явна чи неявна) для рівнянь виду (15).

У результаті маємо рівняння Пуассона для електричного потенціалу φ на часовому шарі $n+1$, $m+1$ з урахуванням об'ємної щільності заряджених частинок n_+ і n_- на цьому ж часовому шарі у вигляді

$$(\hat{\varphi}^{n+1,m+1} - \hat{\varphi}^{n+1,m}) / \Delta \tau_\varphi = -\hat{R}_\varphi^{n+1,m+1} + \hat{S}_\varphi^{n+1,m}, \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \hat{R}_\varphi^{n+1,m+1} &= \frac{\partial \hat{\varphi}_\xi^{n+1,m+1}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\varphi}_\eta^{n+1,m+1}}{\partial \eta} + \\ &+ \frac{e\Delta\tau_n}{\varepsilon_0} \left[\frac{\partial(\hat{H}_{\xi,+} - \hat{H}_{\xi,-})}{\partial \xi} + \frac{\partial(\hat{H}_{\eta,+} - \hat{H}_{\eta,-})}{\partial \eta} \right]^{n+1,m+1}, \\ \hat{S}_\varphi^{n+1,m} &= -\frac{e}{\varepsilon_0} (\hat{n}_+ - \hat{n}_-)^{n+1,m} - \frac{e\Delta\tau_n}{\varepsilon_0} \left(-\frac{\partial \hat{n}_+}{\partial t} + \frac{\partial \hat{D}_{\xi,+}}{\partial \xi} + \right. \\ &\left. + \frac{\partial \hat{D}_{\eta,+}}{\partial \eta} + \hat{S}_+ + \frac{\partial \hat{n}_-}{\partial t} - \frac{\partial \hat{D}_{\xi,-}}{\partial \xi} - \frac{\partial \hat{D}_{\eta,-}}{\partial \eta} - \hat{S}_- \right)^{n+1,m}. \end{aligned}$$

Лінеаризуємо нев'язку $R^{\hat{n}+1,m+1}$ і запишемо рівняння (25) у дельта-формі, з огляду на

$$\begin{aligned} \Delta\varphi^{n+1,m} &= \varphi^{n+1,m+1} - \varphi^{n+1,m} \\ [1 / (J\Delta\tau_\varphi) + (\partial \hat{R}_\varphi / \partial \varphi)^{n+1,m}] \Delta\varphi^{n+1,m} \\ &= -\hat{R}_\varphi^{n+1,m} + \hat{S}_\varphi^{n+1,m}. \end{aligned} \quad (26)$$

Лінеаризацію рівняння (25) виконано за псевдочасом. Нев'язку R даного рівняння можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} \hat{R}_\varphi^{n+1,m} &= \\ &= \frac{\partial \hat{\varphi}_\xi^{n+1,m}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\varphi}_\eta^{n+1,m}}{\partial \eta} + \sum_k \frac{\partial \hat{\varphi}_\xi^{n+1,m}}{\partial \xi} + \sum_k \frac{\partial \hat{\varphi}_\eta^{n+1,m}}{\partial \eta}, \end{aligned} \quad (27)$$

де

$$\begin{aligned} k &= N_4^+, N_2^+, O_4^+, O_2^+, O_2^-, O^-, e, \\ \alpha &= e\Delta\tau_n |\mu_k| \langle n_k \rangle / (\varepsilon_0 J), \\ \hat{\varphi}_\xi &= \frac{\varepsilon_r}{J} \left[(\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right], \\ \hat{\varphi}_\eta &= \frac{\varepsilon_r}{J} \left[(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right], \\ \hat{\varphi}_\xi &= \alpha \left[(\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right], \\ \hat{\varphi}_\eta &= \alpha \left[(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right]. \end{aligned}$$

Кутовими дужками позначено протипоточну апроксимацію n на грань контрольного об'єму (16) для збереження адвекції. Апроксимація других похідних для φ здійснюється за скінченно-об'ємними співвідношеннями з урахуванням несиметрично «відфільтрованого» значення n .

Термін «фільтрація» вводиться спеціально для акцентування нової чисельної апроксимації других похідних від φ з урахуванням адвекції n . Основною особливістю розробленої чисельно-аналітичної моделі є використання раціональної кількості рівнянь для опису всіх основних нестационарних параметрів діелектричного бар'єрного розряду у повітрі. Обрані 14 видів частинок забезпечують високу точність математичного моделювання основних плазмохімічних реакцій, включаючи як поверхневі процеси, так і швидкоплинні явища у просторі (розвиток стримера та електронних лавин).

3. РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

З метою верифікації розробленої чисельно-аналітичної математичної моделі були проведені тестові розрахунки діелектричного бар'єрного розряду при роботі плазмового актуатора у нерухомому повітрі при атмосферному тиску.

Початкові дані відповідають експериментальним роботам [4, 6]. Діелектриком був керамічний матеріал Масог з відносною діелектричною проникністю $\varepsilon_r = 6$ і товщиною $d = 2.1$ мм. Відносна діелектрична проникність повітря $\varepsilon_r = 1.0006$. Електроди виготовлено із смужок міді. Довжина відкритого електрода становила 5 мм, а ізольованого — 25 мм. До верхнього електрода прикладалася напруга амплітудою $\varphi^{\max} = 7$ кВ [4] і $\varphi^{\max} = 12$ кВ [6], частотою 5 кГц і 200 Гц відповідно. Розглядалась чверть періоду коливання прикладеної напруги для демонстрації можливостей розробленої нової математичної моделі.

В експерименті діелектрична поверхня складалася з дрібних сегментів, що дало можливість виміряти розподіл напруги по поверхні діелектрика.

Для адекватного опису зародження, розвитку й проходження стримера використовувався змінний крок інтегрування за часом ($\Delta t = 10^{-7} \dots 10^{-12}$ с). Початок координат збігався з правим краєм відкритого електрода. Багатоблокова сітка, що описує геометрію розрахункової області поблизу плазмового актуатора, складається з п'яти блоків: один для повітряної області (10^4 вузлів) і чотири для області діелектрика (по 10^4 вузлів). Мінімальний крок сітки поблизу правого краю відкритого електрода становить 10^{-5} м.

На рис. 1—3 показано зміну щільності \mathbf{n} різних хімічних елементів плазми діелектричного бар'єрного розряду у просторі і часі при $\varphi^{\max} = 7$ кВ [4] і частоті 5 кГц, а також щільність сумарного об'ємного заряду ρ і компоненти сили Лоренца f_x, f_y , віднесені до одиниці об'єму. Тут же наведено розподіли сумарного ($\varphi = \varphi_{el} + \varphi_{p,\sigma}$) і прикладеного (φ_{el}) електричного потенціалів, а також розподіл потенціалу $\varphi_{p,\sigma}$ від об'ємного й поверхневого зарядів, а також модуля напруженості електричного поля $|\mathbf{E}|$.

Механізм формування і розвитку окремого мікророзряду складається із трьох послідовних стадій (рис. 1—3).

На першій стадії зі збільшенням прикладеної напруги φ_{el} (рис. 1, *д*) відбувається збільшення напруженості електричного поля поблизу правого краю відкритого електрода (рис. 1, *ж*). Це призводить до часткової іонізації повітря в цій області (рис. 1, *а*) за рахунок формування електронних лавин. На цій стадії концентрація заряджених частинок настільки мала, що сумарний об'ємний заряд практично не впливає на зовнішнє електричне поле від електродів (рис. 1, *з—е*).

Чотирнадцять рисунків групи (*а*) показують розподіли щільності частинок плазми в порядку розташування складових вектора (*б*)

$$\mathbf{n} = [n_{N_4^+}, n_{N_2^+}, \dots, n_e]^T$$

для моменту часу $2.500677 \cdot 10^{-5}$ с. Кількісні значення розподілів параметрів наведено у табл. 2.

Електрони, прискорюючись в електричному полі, іонізують молекули азоту й кисню поблизу правого краю відкритого електрода, формуючи електронні лавини, а при попаданні на поверхню електрода поглинаються анодом. Коли напруженість електричного поля досягає величини порядку 10^7 В/м, у прианодному шарі відбувається значне зростання щільності сумарного заряду ρ , що утворюється позитивними іонами азоту й кисню (рис. 1, *б*). Перша стадія мікророзряду тривала $2.5007 \cdot 10^{-5}$ с.

На другій стадії процесу відбувається лавино-стрімерний перехід, при якому електричне поле просторового заряду головки лавини досягає зовнішнього поля. У цьому випадку потенціал від об'ємного заряду $\varphi_{p,\sigma}$ досягає величини прикла-

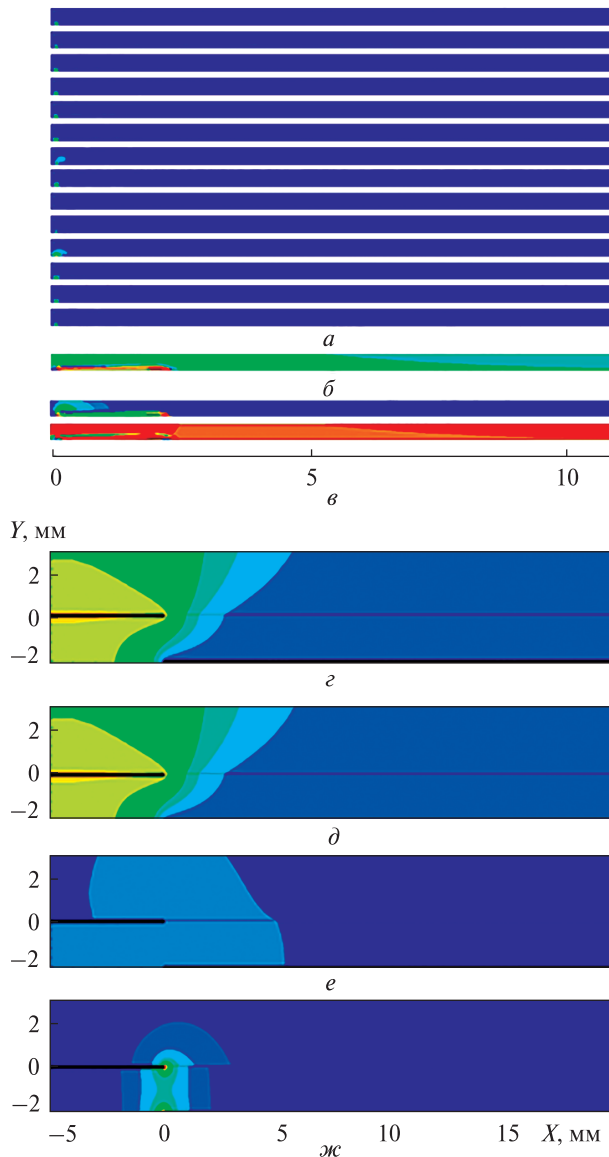


Рис. 1. Розподіл щільності хімічних елементів плазми (*а*), об'ємного заряду (*б*), складових сили Лоренца (*в*), сумарного (*з*) та прикладеного (*д*) електричного потенціалів, потенціалу від об'ємного і поверхневого зарядів (*е*), а також модуля напруженості електричного поля (*ж*) для моменту часу $2.500677 \cdot 10^{-5}$ с

деної напруги φ_{el} , що призводить до формування катодспрямованого стримера.

Надалі повітря іонізується завдяки сильному власному полю стримерної головки (рис. 2 і 3), що призводить до розвитку стримера ($t = 2.500850 \cdot 10^{-5}$ с і $t = 2.504733 \cdot 10^{-5}$ с). Стример

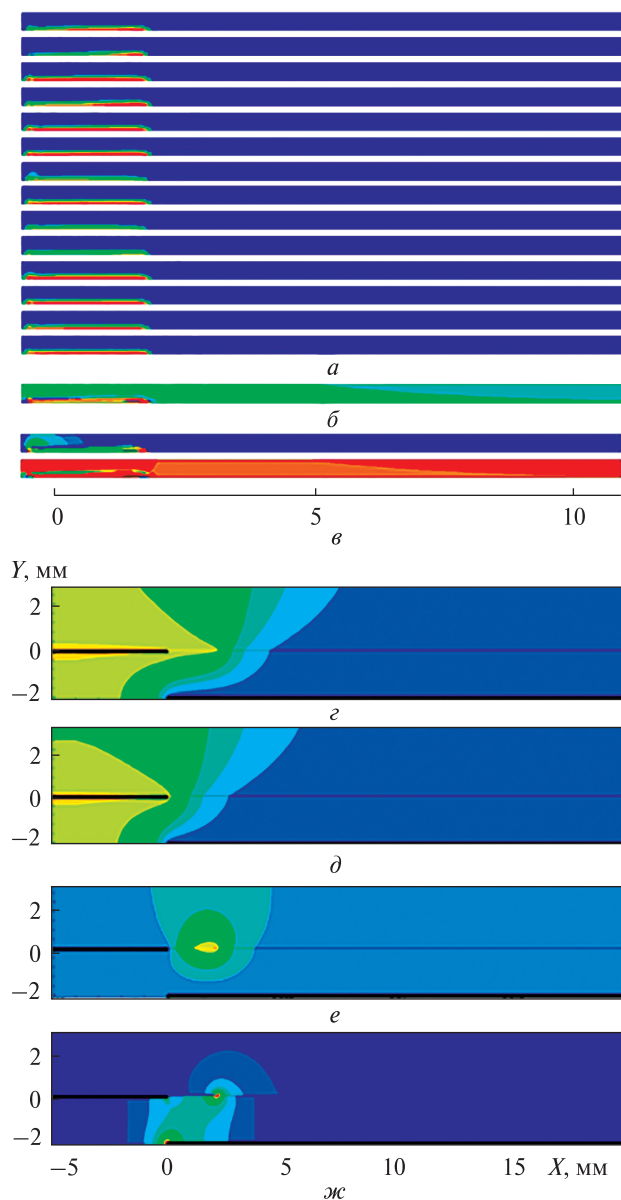


Рис. 2. Те ж для моменту часу $2.500850 \cdot 10^{-5}$ с

починає поширюватися від анода й рухається над поверхню діелектрика. У середині каналу стримера щільність сумарного заряду близька до нуля і істотна лише на поверхні, особливо у голівці стримера (рис. 2, б і 3, б), внаслідок чого напруженість усередині стримерного каналу значно нижча, ніж поза стримером (рис. 2, ж і 3, ж), що добре узгоджується з наявними фізичними уявленнями.

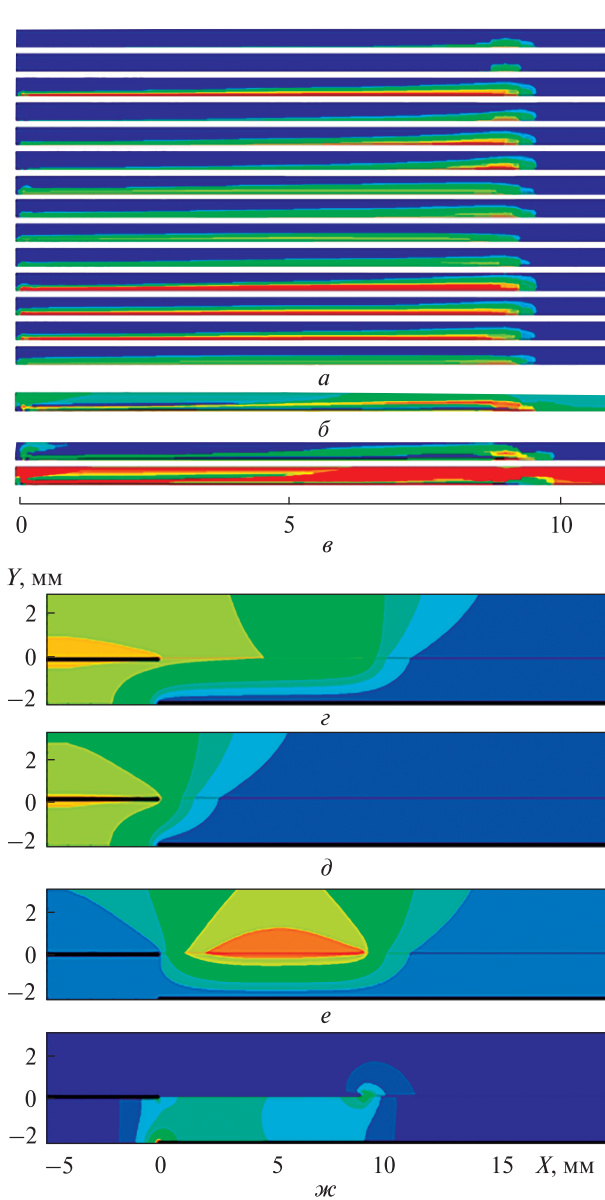


Рис. 3. Те ж для моменту часу $2.504733 \cdot 10^{-5}$ с

Із рис. 2, ж видно, як потенціал об'ємного й поверхневого зарядів $\varphi_{p,\sigma}$ спотворює розподіл прикладеного потенціалу (рис. 2, д). За результатами чисельного моделювання розрахований радіус стримерного каналу дорівнює $10^{-4} \dots 10^{-3}$ м, щільність частинок у ньому — $10^{19} \dots 10^{20} \text{ м}^{-3}$, ступінь іонізації повітря дорівнює $10^{-6} \dots 10^{-5}$. Швидкість зростання стримера — порядку 10^6 м/с, що добре узгоджується з наявними експеримен-

Таблиця 2. Кількісні значення розподілу параметрів

$n, \text{м}^{-3}$	$\rho, \text{Кл/м}^3$	$f_x, \text{Н/м}^3$	$f_y, \text{Н/м}^3$	$\frac{\varphi}{\varphi_{\max}}, \frac{\varphi_{el}}{\varphi_{\max}}$	$\frac{\varphi_{p,\sigma}}{\varphi_{\max}}$	$ E , \text{МВ/м}$
1e+21	1	1e+7	0	0.9	0.6	10
1e+20	0.05	1e+6	-1e+1	0.8	0.5	9
1e+19	0.01	1e+5	-1e+2	0.7	0.4	8
1e+18	0.005	1e+4	-1e+3	0.6	0.3	7
1e+17	0	1e+3	-1e+4	0.5	0.2	6
1e+16	-0.005	1e+2	-1e+5	0.4	0.1	5
	-0.01	1e+1	-1e+6	0.3	0	4
		0	-1e+7	0.2		3
				0.1		2
				0		1

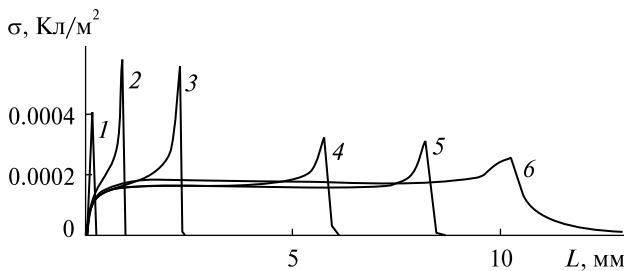


Рис. 4. Розподіл поверхневого заряду на діелектрику для різних моментів часу (1 — $2.500772 \cdot 10^{-5}$ с, 2 — $2.500850 \cdot 10^{-5}$ с, 3 — $2.501045 \cdot 10^{-5}$ с, 4 — $2.502314 \cdot 10^{-5}$ с, 5 — $2.504733 \cdot 10^{-5}$ с, 6 — $5.0 \cdot 10^{-5}$ с)

тальними даними [1, 10]. Тривалість другої стадії відповідає часу зародження й поширення стримера і приблизно дорівнює $4.3 \cdot 10^{-8}$ с.

При розвитку стримера поверхня діелектрика заряджається, оскільки об'ємний заряд, що утворюється, при русі в електричному полі зустрічає перешкоду у вигляді поверхні діелектрика й осідає на ній. Адсорбований заряд спотворює поле розрядного проміжку, внаслідок чого напруженість електричного поля у повітрі поблизу електродів слабшає (рис. 3, ж), що призводить до згасання розряду. Позитивний заряд на поверхні діелектрика забезпечують в основному іони азоту N_4^+ і кисню O_4^+ . Розподіл поверхневого заряду на діелектрику (рис. 4) наведено для різних моментів часу (1 — $2.500772 \cdot 10^{-5}$ с, 2 — $2.500850 \cdot 10^{-5}$ с, 3 — $2.501045 \cdot 10^{-5}$ с, 4 — $2.502314 \cdot 10^{-5}$ с, 5 — $2.504733 \cdot 10^{-5}$ с, 6 — $5.0 \cdot 10^{-5}$ с).

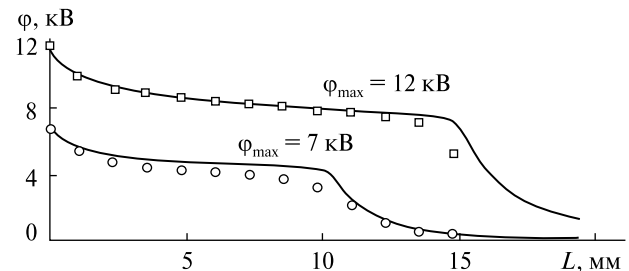


Рис. 5. Розподіл електричного потенціалу по поверхні діелектрика при максимальному значенні прикладеної напруги (кружечки — експеримент [5], квадратиками — експеримент [6], суцільна лінія — дана робота)

На третій стадії основну роль відіграють процеси дифузії та дрейфу заряджених часток до діелектричної поверхні і відкритого електрода. Тривалість останньої стадії мікророзряду приблизно $2.495 \cdot 10^{-5}$ с.

Отримано розподіл електричного потенціалу по поверхні діелектрика при максимальній напрузі, яку було прикладено до електродів, 7 і 12 кВ (рис. 5). Суцільною лінією позначено результати цієї роботи, кружечками — дані [4], квадратиками — дані [6]. Різке спадання напруги на діелектрику зумовлене довжиною поширення стримера, і як наслідок — падінням щільності поверхневого заряду. Так, при максимальних значеннях прикладеної напруги 7 і 12 кВ довжина поширення стримера становить $L=0.01$ м і $L=0.015$ м відповідно. Результати чисельного моделювання показують задовільний збіг з експериментальними даними.

ВИСНОВКИ

1. Сформульовано нову математичну модель діелектричного бар'єрного розряду у повітрі, що включає нестационарні електродинамічні процеси, кінетичні явища й плазмохімічні реакції.

2. Запропоновано нову взаємно узгоджену систему вихідних рівнянь для електричного потенціалу й 14 рівнянь динаміки заряджених частинок плазми, що записана в довільній криволінійній системі координат і використовує різний масштаб псевдочасу в окремих рівняннях.

3. Розроблено модифікацію чисельної схеми розв'язування рівняння Пуассона для електричного потенціалу з безпосереднім виділенням диференціальних операторів для ϕ з використанням протипотокової апроксимації щільності заряджених частинок у других похідних.

4. Реалізовано єдиний неявний чисельний алгоритм для ефективного розв'язування неоднорідної системи вихідних рівнянь.

5. Проведено тестові розрахунки зародження й розвитку потоку плазми поблизу плоскої пластини.

REFERENCES

1. Abe T., Takagaki M. (2009). Momentum coupling and flow induction in a DBD plasma actuator. *AIAA Paper*, No. 1622, 8.
2. Bogdanov E. A., Kolobov V. I., Kudryavtsev A. A., Tsendin L. D. (2002). Scaling laws for oxygen discharge plasmas. *Technical Phys.*, **47**(8), 946–954.
3. Corke T., Jumper E., Post M., Orlov D. (2002). Application of weakly ionized plasmas as wing flow control devices. *AIAA Paper*, No. 350, 9.
4. Enloe C., McLaughlin T., Gregory J., Medina R. (2008). Surface potential and electric field structure in the aerodynamic plasma actuator. *AIAA Paper*, No. 1103, 11.
5. Enloe C., McLaughlin T., Van Dyken R., Fischer J. (2004). Plasma structure in the aerodynamic plasma actuator. *AIAA Paper*, No. 844, 8.
6. Font G., Enloe C., Newcomb J., Teague A., Vasso A. (2010). Effects of oxygen content on the behavior of the dielectric barrier discharge aerodynamic plasma actuator. *AIAA Paper*, No. 545, 16.
7. Forte M., Jolibois J., Moreau E., Touchard G., Cazalens M. (2006). Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity — application to airflow control. *AIAA Paper*, No. 2863, 9.
8. Hagelaar G. J., Pitchford L. C. (2005). Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **44**, 6, 722–733.
9. Kossyi A., Kostinsky A., Matveyev A., Silakov V. (1992). Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures. *Plasma Sources Sci. and Technol. Technical Phys.*, **1**, 3, 207–220.
10. Nudnova M., Kindusheva S., Aleksandrov N., Starikovskiy A. (2010). Rate of plasma thermalization of pulsed nanosecond surface dielectric barrier discharge. *AIAA Paper*, No. 465, 15.

Received 02.09.2019

*D. O. Redchyt's*¹

Head Dep., Dr. Sci. in Phys. & Math., Senior Researcher

E-mail: redchits_da@ua.fm

*S. V. Moiseienko*²

Docent, Cand. Sci. in Tech.

¹Institute of Transport Systems and Technologies of NAS of Ukraine

Pisarzhevsky street 5, Dnipro, 49005 Ukraine

²Kherson National Technical University

Berislavske shose 24, Kherson, 73008 Ukraine

NUMERICAL SIMULATION OF UNSTEADY FLOWS OF COLD PLASMA DURING PLASMA ACTUATOR OPERATION

The numerical simulation of unsteady flows of cold plasma is considered in this article. A low-temperature non-equilibrium ideal plasma is formed when the plasma actuator interacts with the air. The mathematical model has been developed to describe the behavior of low-temperature plasma. It is based on non-stationary equations describing the dynamics of charged particles and plasma electrodynamics equations. The 14 types of particles: metastable and excited nitrogen and oxygen atoms, positive and negative ions, electrons and atomic oxygen are considered. Volumetric and surface chemical reactions describing processes in a barrier discharge that occur above the dielectric surface are considered. For non-stationary equations of plasma dynamics, an implicit numerical algorithm with pseudo-time iteration has been developed, which is based on a finite-volume approach.

The equation for the electrostatic potential with sources was solved using the generalized minimal residual method with incomplete LU preconditioning. In non-stationary equations for the density of plasma particles, the drift derivatives were approximated using the TVD scheme with the MinMod limiter function. The derivatives in the equation for the electric potential were calculated using finite-volume relations taking into account the upwind approximation of the concentration of charged plasma particles. The numerical results of the generation, propagation and destruction of a streamer during a dielectric barrier discharge are obtained. The unsteady plasma characteristics in the region above the dielectric surface are analyzed, including the distribution of the particles density, electric potential and the Lorentz force components. The results of numerical simulation of unsteady flows of low-temperature plasma are in good agreement with the available experimental data.

Keywords: cold plasma, mathematical simulation, numerical methods, plasma actuator.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.01.097>
UDC 621.454

M. V. ANDRIIEVSKIY^{1,2}, Postgraduate, head of Propulsion Systems Department of the Ukrainian branch of Skyrora Ltd
E-mail: andrievsky.ukraine@gmail.com

Y. O. MITIKOV¹, Department Chair, Doctor of Science, assistant professor
E-mail: mitikov2017@gmail.com

¹ Oles Honchar Dnipro National University
72 Gagarina Ave, Dnipro, 49010 Ukraine

² Skyrora Ltd, Edinburgh, UK

INFLUENCE OF PROPELLANT LEAKAGE FROM PUMP AREA INTO TURBINE AREA ON TURBO-PUMP OPERATION STABILITY

There is an increasing trend to liquid-propellant rocket engines which run on eco-friendly storable propellant. This trend is mostly dictated by the refusal to use traditional toxic storable propellant in many countries. The most widespread eco-friendly storable propellant is hydrogen peroxide with kerosene. Though, this propellant has a lower specific impulse in comparison with traditional liquid oxygen with kerosene. To compensate the loss of specific impulse, there is a reason to design a staged combustion engine. Evidently, the turbopump is the most complicated system in the staged combustion propulsion system. This fact makes research devoted to turbo-pumps a top priority. The paper aims to determine the influence of propellant leakage from the pump area into the turbine area and create recommendations which would allow organizing the stable operation of turbopump. As a result of turbopump staged combustion cycle testing, a conclusion had been made that leakage, which opens during the test, significantly influences the stability of turbopump operation. Depending on the amount of leakage, the turbine generated power drop was between 20 and 45 %, which led to a decrease in rotation speed and outlet pressure of the pump. During the R&D process, a way of leakage influence elimination had been offered. Formulated recommendations may be used during the design process of the turbopump for staged combustion liquid propulsion systems.

Keywords: Hydrogen peroxide, leakage, operational stability, turbo-pump, rocket engine, mechanical sealing.

INTRODUCTION

Recently in the world there has appeared a steadily growing interest in liquid propulsion systems, which operate on environmentally friendly storable propellant. This is mainly due to the refusal of traditional toxic propellant components in many countries [4]. Another important trend in the development of propulsion systems is the necessity to reduce either the development and operational costs of launch vehicles, which makes storable ecologically friendly propellant the most attractive. The most widespread pair

of components for such type of propellant is hydrogen peroxide with kerosene [1].

The only drawback of this propellant is a relatively low specific impulse in comparison with the cryogenic propellant like liquid oxygen with kerosene. However, this disadvantage can be easily compensated by using the staged combustion cycle. In this case, an insignificant complication of the engine design will make it possible to create a liquid rocket engine with specific characteristics even higher than the liquid rocket engine, which runs under the gas generator cycle on

Цитування: Andriievskiy M. V., Mitikov Y. O. Influence of propellant leakage from pump area into turbine area on turbo-pump operation stability. *Space Science and Technology*. 2021. 27, № 1 (128). С. 97—102. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.097>

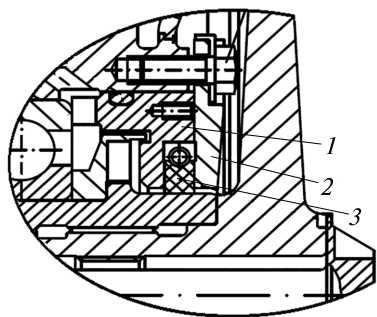


Fig. 1. Sealing unit of the RD 861K rocket engine turbopump: 1 – seal housing, 2 – cover, 3 – graphite gas ring

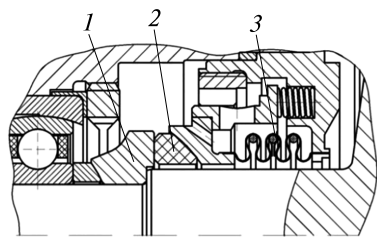


Fig. 2. Sealing unit of RD 858 rocket engine turbopump: 1 – support sleeve, 2 – graphite semi-spherical ring, 3 – bellows

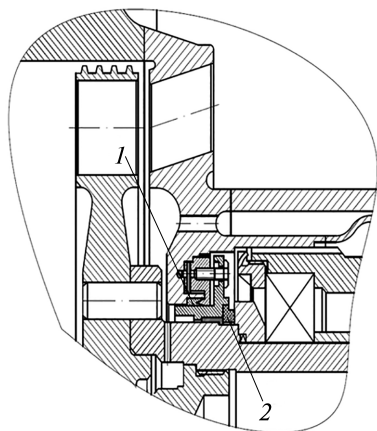


Fig. 3. Sealing unit of the RD 123K rocket engine turbopump: 1 – aluminum cuff, 2 – graphite ring

liquid oxygen and kerosene [6]. Moreover, there are other advantages of the staged combustion cycle, such as simplicity of the start mode organization [3] and the possibility of its regulation in a wide range [2].

The most complex and knowledge-intensive unit in staged combustion liquid-propellant rocket engine is a turbopump unit. Due to its energy intensity, high pressure at the outlet of the pumps, and high rotation speed, it is rather difficult to make its operation stable.

FORMULATION OF THE PROBLEM

This article aims to describe the reasons for the unstable operation of the turbopump during tests using mathematical modeling. Another purpose is to propose a solution to stabilize the turbopump operation.

In this case, the term “instability” of turbopump operation should be understood as a spontaneous fall of its operational mode due to the influence of various internal factors such as leaks between cavities, the influence of axial forces, or mechanical contact of rotor parts with the stator parts.

As soon as necessary changes to ensure the stability of the turbopump are applied, their relevance should be verified in the test. According to its results, it will be possible to conclude about the consistency of the proposed theory and the efficiency of the applied changes, which should eliminate the negative influence of internal factors on the operating mode of the unit.

REVIEW OF THE LITERATURE

In the XX century, the space industry had accumulated huge experience in the organization of seals between the cavities of pumps and turbine for turbopumps of engines, which run either under gas generator cycle or oxidizer rich gas staged combustion cycle.

Consider the seal between the cavities of the pump and the turbine. The boundary condition is the same pressure from the pump and the turbine cavities. In this case, it is preferable to use a split gas ring made of graphite in order to seal these cavities. In figure 1, a sealing unit of the RD 861K rocket engine turbopump is shown [8].

For the most important places, such as a cavity between the oxidizer pump and the turbine, which is driven by fuel-rich gas, mechanical seals made of graphite are applied. In figure 2, the sealing unit of the RD 858 rocket engine turbopump is presented [7].

Turbopumps designed for rocket engines, which run under a staged combustion cycle, have a much more complicated sealing block between the pump and the turbine. The reason for this is the significant pressure drop between an oxidizer pump cavity and a turbine cavity in addition to high rotation speed and high temperature from the turbine side. This pressure drop is equal to the difference between pump outlet pressure and turbine inlet pressure. In existing staged combustion rocket engines, this pressure drop may reach 50 % to 100 % of total pump outlet pressure. This fact makes it almost impossible to seal these cavities totally.

Usually, in turbopump units for rocket engines, which run on liquid oxygen and kerosene, sealings with guaranteed leakage of liquid oxygen into the turbine cavity are designed.

In figure 3, a sealing unit of the RD 123K rocket engine turbopump is shown [5].

The idea of this seal operation is in providing tightness between the oxidizer pump cavity and the turbine cavity during the preparation process, such as the evacuation of the gas from the pipes and filling them up with propellant. However, as soon as the pressure at the pump outlet rises, the sealing opens like a valve, and as a result, a stable leakage of liquid oxygen into the turbine cavity appears. Taking into account that in rocket engines liquid oxygen is a supercritical fluid, this leakage does not lead to the change of turbopump parameters.

Mechanical seals are the most reliable type of sealing, but even they do not provide 100% tightness in such difficult conditions. Moreover, applying this type of sealing is connected with a number of technological and logistical difficulties such as:

- limited amount of raw material suppliers;
- welding issues of bellows with thin walls;
- a significant increase of axial dimensions of the unit.

Taking into account that even this type of sealing does not provide 100 % tightness in such harsh operational conditions, it is reasonable to consider an easier design of the sealing block, which would provide tightness during launch preparation processes.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF TURBOPUMP PARAMETERS' STABILIZATION

Considering that hydrogen peroxide is a non-aggressive storable oxidizer, the design of the sealing block may be significantly simplified. The traditional combination of a rubber O-ring with a supporting fluoro-plastic ring had been applied. The main idea of this sealing block is to provide tightness by means of the rubber O-ring during the preparation process. As soon as the operation of the turbopump is started, it was expected that the rubber O-ring would wear out in a short period of time causing the leakage of hydrogen peroxide, which would be restricted by a floating ring. In this case, the amount of leakage will be determined by the gap between the floating ring

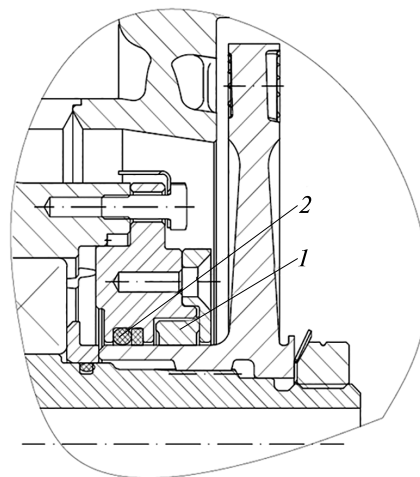


Fig. 4. Chosen sealing unit: 1 — floating ring, 2 — rubber O-ring with the supporting fluoro-plastic ring

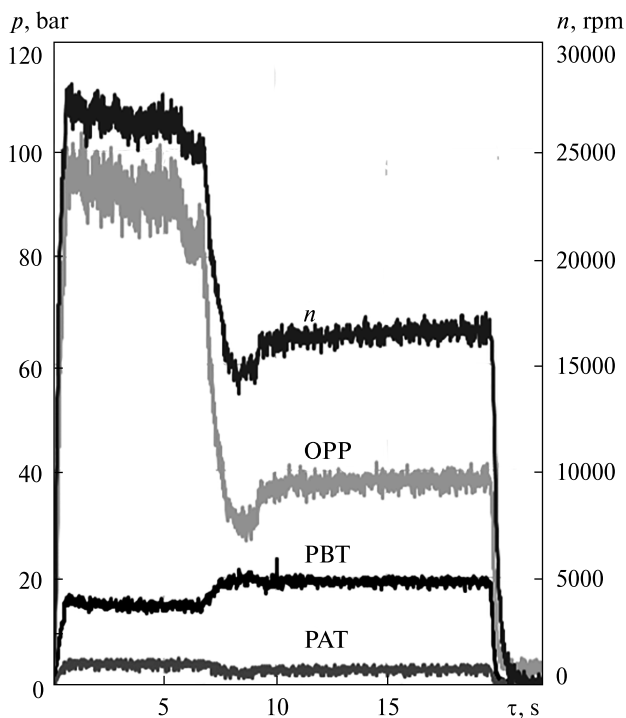


Fig. 5. Main operational parameters of the turbopump: PBT — pressure before the turbine, PAT — pressure after the turbine, OPP — oxidizer pump pressure

and the rotor. In figure 4, the chosen sealing unit design is shown.

During the set of turbopump tests, a rapid drop of rotation speed was being registered as soon as the rubber O-ring was worn out. In figure 5, the diagram

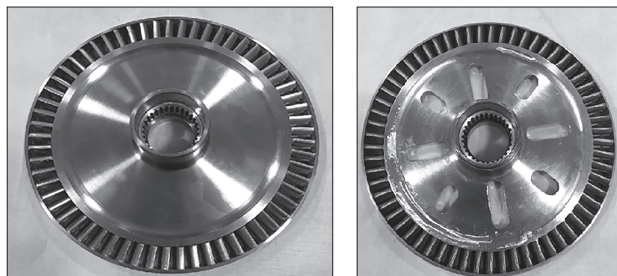


Fig. 6. Turbine wheel before and after upgrade

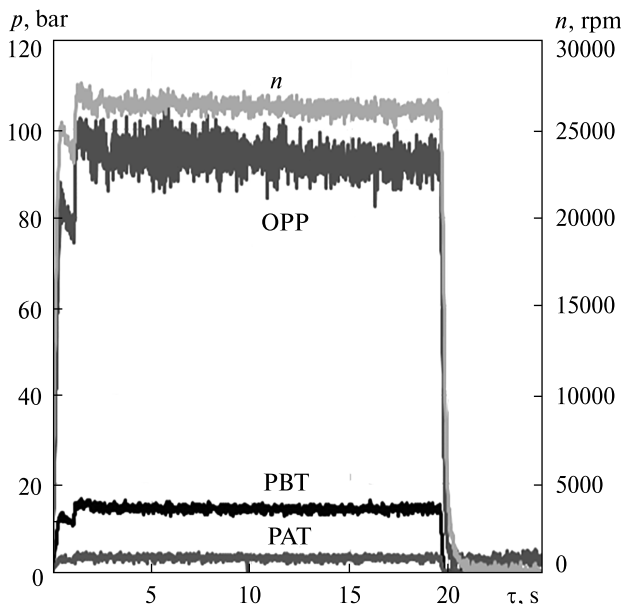


Fig. 7. Main operational parameters of the turbopump after the upgrade: PBT — pressure before the turbine, PAT — pressure after the turbine, OPP — oxidizer pump pressure

with the main operational parameters of the turbopump, which were registered during tests, is presented.

As it is shown in figure 5, after the 8th second of the test, a rapid change of the turbopump operation mode took place. The drop of the turbopump rotation speed was 38 % in relation to the initial mode. Analysis of the parts of the rotor and stator of the turbopump and mathematical modeling made it possible to conclude that the reason for a mode change was an open leakage from the oxidizer pump cavity into the turbine cavity.

To explain the physical reason for the rapid drop of the operational mode, the mathematical model which describes the operational process of the tur-

bine was created. The main equation in this model was the mass conservation law, expressed in integral form:

$$\dot{m}_t = \frac{F_t p_{BT}}{\sqrt{RT_{AT}}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{AT}}{p_{BT}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{AT}}{p_{BT}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

F_t — Square area of the turbine, p_{BT} — pressure at the turbine inlet, RT_{AT} — specific energy capacity, p_{AT} — pressure at the turbine outlet, k — specific heat ratio.

The solution to the system of equations bundles the mass flow rate equation through stator blades, mass flow rate equation through rotor blades, and mass flow rate through the oxidizer pump, giving a physical description of the process. It follows that the cause of the drop of the operational mode was throttling of the rotor blades by the opened leakage. This led to a significant reduction of the turbine wheel throughput, which consequently caused a decrease in the gas mass flow rate. According to the mathematical model, the drop in power generated by the turbine corresponds to a 44 % reduction in turbine wheel throughput.

As a solution to this issue, it was proposed to arrange drainage from the cavity by making eight oval-shaped holes in the turbine wheel neck. This solution should prevent the oxidizer from entering the blades of the turbine wheel. In the upper part of figure 6, the turbine wheel in the initial condition is presented. The upgraded turbine wheel is presented in the bottom part of the same figure with milled oval-shaped holes for drainage of the oxidizer, which leaks from the pump cavity into the turbine cavity.

The main idea of this modification is to eliminate the leakage influence on parameters of the turbopump operation instead of dealing with the leakage itself. To verify this theory, a series of turbopump tests with the upgraded turbine wheel was performed. For the purity of the experiment, no other changes were implemented to the design of the turbopump. As a result of the experiment, a stable operational mode of the turbopump was achieved, which confirmed the initially put forward hypothesis. In figure 7, the diagram with the main turbopump parameters of the qualification test is presented.

From the test results, it follows that increasing the impulsivity of the turbine due to oval-shaped drain-

age holes ensures the complete elimination of the influence of leakage on the operational parameters of the turbopump. As a result, it allowed achieving the stable operation of the turbopump.

To estimate the influence of changes in the turbine impulsivity on the turbine efficiency, the estimation method, which is based on qualified pump parameters, was chosen.

Turbine efficiency was estimated according to the formula:

$$\eta_t = \frac{\dot{m}_p \Delta p_p}{\rho_p \eta_p L_{ad} \dot{m}_t},$$

\dot{m}_p — mass flow rate of liquid through the pump, Δp_p — pump head, ρ_p — density of liquid in the pump, η_p — efficiency of the pump, L_{ad} — adiabatic velocity, \dot{m}_t — gas mass flow rate through the turbine.

According to the method used for the efficiency estimation, it was determined experimentally that drainage holes in the turbine wheel caused a reduction of turbine efficiency by 1.5 % but allowed achieving the stable operation of the turbopump.

CONCLUSIONS

The presented research allowed us to create the mathematical description of the physical process,

which caused a rapid drop of generated power by a turbine running on decomposed hydrogen peroxide. Understanding these processes is critical for arranging of stable operation of the turbopump.

Along the way, mathematical, methodological, and structural decisions, which should provide stable operation of turbopump for such liquid-propellant rocket engine, have been offered.

Analysis of the research results shows that they could have significant practical value concerning the design process of turbopumps for liquid-propellant rocket engines running on hydrogen peroxide and kerosene:

1. Leakage of oxidizer on turbine wheel blades causes a reduction of throughput, which consequently leads to the significant drop in the generated power.

2. Drainage holes in the turbine wheel allow the eliminating of the influence of oxidizer leakage on the operational parameters of the turbopump.

3. The reduction of the turbine degree of reaction allowed arranging the stable operation of the turbine, causing a decrease in turbine efficiency. However, its influence on the overall efficiency of staged combustion rocket engine running on hydrogen peroxide is negligible.

REFERENCES

1. Anderson W. E., Butler K., Crockett D., Lewis T., McNeal C. (2000). *Peroxide propulsion at the turn of the century*. 4th International Symposium on Liquid Propulsion (3 March 2000), Heilbronn, Germany, 59 p.
2. Andriievskiy M. (2019). Peculiarities of start transience of the rocket engine which runs on eco-friendly storable propellant. *Vestnik Dvigatelistroeniya*, No. 1, 29—34 [in Russian].
3. Andriievskiy M., Mitikov Y., Shamrovskiy D. (2018). Control Peculiarities of Rocket Engine Which Runs on Ecologically-friendly Storable Propellant. *Vestnik Dvigatelistroeniya*, No. 1, 16—21 [in Russian].
4. de Selding Peter B. (2016). *SSTL Developing Non-toxic Thruster ahead of Possible European Hydrazine Ban*. Paris: Space News.
5. Geymberger Yu. O., Gorbenko G. A., Shementov A. M. (2009). Design and Development of Liquid Propulsion Engines Feeding Systems. *RVV DNU*, 96 p.
6. Huzel D. K., Huang D. H. (1967). *Design of Liquid Propellant Rocket Engines*. Houston: National Aerospace and Space Administration, 461 p.
7. Ivanov Ya. N., Badun O. P., Deshevyyh S. A., Ivchenko L. F. (2018). Turbo-Pumps of Rocket Engines designed in Yuzhnoye design office. *Kosmicheskaya tehnika. Raketnoe vooruzhenie*, No. 2, 26—33 [in Russian].
8. Ivchenko L. F., Deshevyyh S. A., Maksimchuk R. F. (2012). Design experience of RD 861K autonomous turbine. *Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*, No. 9, 174—179 [in Russian].

Received 10.01.2021

М. В. Андриєвський^{1, 2}, аспірант, нач. відділу двигунобудування українського філіалу компанії Skycoga Ltd
E-mail: andrievsky.ukraine@gmail.com

Ю. О. Мітків¹, зав. кафедри, д-р техн. наук, доцент
E-mail: mitikov2017@gmail.com

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
Проспект Гагаріна 72, Дніпро, Україна, 49010

²Skycoga Ltd, Единбург, Великобританія

ВПЛИВ ВИТОКУ КОМПОНЕНТА З ПОРОЖНИНИ НАСОСА В ОБЛАСТЬ ТУРБІНИ НА СТІЙКІСТЬ РОБОТИ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА

Останнім часом в світі стабільно зростає інтерес до РРД, що працюють на екологічно чистому паливі. Це зумовлено законодавчою відмовою багатьох країн від токсичних компонентів. Відомо, що найбільш поширеними висококиплячими екологічно чистими компонентами палива є пара перекис водню — гас. Однак двигуни, що працюють на цій парі компонентів палива, характеризуються нижчим питомим імпульсом ніж двигуни, що працюють на компонентах кисень — гас. Для компенсації цієї різниці доцільно проектувати двигуни по схемі з допалюванням генераторного газу. Відомо, що турбонасосний агрегат (ТНА) є найбільш складним і наукомістким агрегатом у двигуні такої схеми. Цей факт робить актуальним наукові роботи, спрямовані на вивчення процесів у ТНА. Надзвичайно важливим є визначення впливу витоку компонента з порожнини насоса у порожнину турбіни і формування рекомендацій щодо організації стійкої роботи турбіни. В результаті натурних випробувань ТНА, спроектованого для РРД з допалюванням генераторного газу, було виявлено, що витік з порожнини насоса у порожнину турбіни суттєвим чином впливає на стійкість роботи ТНА. Залежно від величини витоку спостерігалось падіння потужності, генерованої турбіною, від 20 до 45 %, що призводило до зниження обертів ротора турбонасосного агрегату, і як наслідок — до падіння тиску компонента на виході з насоса. В ході робіт було виявлено причину падіння потужності, що генерується турбіною, і були запропоновані способи зменшення впливу витоку на режим роботи ТНА. Сформовані рекомендації щодо зменшення впливу витоку компонента на режим роботи ТНА можуть бути застосовані для проектування ТНА РРД з допалюванням генераторного газу.

Ключові слова: перекис водню, виток, стійкість роботи, турбонасосний агрегат, ракетний двигун, стояночне ущільнення.