



УДК 550.34:550.510.533

ВПЛИВ НИЖНЬОЇ АТМОСФЕРИ НА ДОВГОТНІ ВАРІАЦІЇ ПОВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ВМІСТУ СЕРЕДНЬОШИРОТНОЇ ІОНОСФЕРИ У ЗИМОВІ СЕЗОНИ 2012 – 2018 РОКІВ

І. Г. Захаров

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків, Україна

e-mail: giz-zig@ukr.net

Актуальність. В останні десятиліття отримано нові результати про вплив потужних метеорологічних процесів на іоносферу. У той же час, залишається нез'ясованим можливість тропосферно-іоносферної взаємодії за межами збурених періодів, що має важливе значення для оцінки енергетики явища та для моделювання динамічних процесів нижньої і верхньої атмосфери як єдиної самоорганізованої системи. У роботі вперше розглянуто можливість впливу нижньої атмосфери на медіанні значення іоносферних параметрів на тлі процесів, зумовлених космічною погодою.

Мета роботи – пошук і аналіз довготривалих довготних ефектів середньошироотної іоносфери у зимовий сезон та їх можливий зв'язок із процесами у нижній атмосфері.

Матеріали та методи. Дослідження проведено з використанням щоденних даних за зимові сезони 2012 – 2018 років на широті 40° пн. ш. на основі карт повного електронного вмісту іоносфери, отриманих з використанням глобальної мережі навігаційних супутників, та глобальних карт тиску та температури приземної атмосфери. Використано також дані про космічну погоду та магнітосферу (індекси сонячної та геомагнітної активності). Використано статистичні методи аналізу.

Результати. Встановлено значні (до 40 % від середнього рівня) постійно існуючі довготні екстремуми повного електронного вмісту іоносфери, що корелюють зі змінами тиску та температури приземної атмосфери. Зв'язок характеризується достовірними коефіцієнтами кореляції від +0.34 до +0.48 у розглянуті сезони. Максимуми повного електронного вмісту припадають на довготи з максимальними градієнтами приземного атмосферного тиску. Вплив космічної погоди через незбіг географічної та геомагнітної систем координат також призводить до довготних ефектів в іоносфері, але без формування локальних екстремумів.

Висновки. Отримані результати свідчать про можливість тривалої або безперервної взаємодії нижньої атмосфери з розташованими вище шарами атмосфери та іоносферою. Враховуючи сталий характер довготних особливостей повного електронного вмісту, зроблено припущення про важливу роль стаціонарних планетарних хвиль у реалізації атмосферно-іоносферних зв'язків.

Ключові слова: повний електронний вміст іоносфери, довготні ефекти, атмосферно-іоносферна взаємодія.

1. Вступ

В наш час вплив літосфери і нижньої атмосфери на іоносферу (вплив "знизу") розглядають, як правило, для періодів значних збурень (метеорологічні шторми, тропічні циклони й урагани, раптові стратосферні потепління, виверження вулканів, землетруси та ін.) (див., наприклад, [1–3]). Деякі автори відзначають (див., наприклад, [4]), що іоносферна мінливість, викликана процесами у нижній атмосфері, можна порівняти з типовою мінливістю, викликаною змінами космічної погоди. Як фізичний механізм впливу розглядають поширення вгору планетарних, припливних й внутрішніх гравітаційних хвиль [1–5], здатних проникати до висот нижньої термосфери. Вважають, що на більші висоти ці неоднорідності передаються за рахунок вторинних ефектів та інших механізмів, вивчених наразі недостатньо.

Таким чином, за сучасними уявленнями, вплив на іоносферу "знизу" носить переважно локальний і епізодичний

характер. Переконливим підтвердженням такої точки зору є те, що величезна кількість робіт з цієї тематики присвячена саме аналізу інтервалів часу з сильними збуреннями. При цьому виникає питання: за межами сильних збурень атмосферно-іоносферні зв'язки незначні або значні, але залишаються непоміченими, тому що періоди без сильних збурень практично не досліджуються?

Розглянемо це питання на прикладі однієї публікації [6], в якій представлені результати про появу стратосферних збурень над сейсмічно-активним регіоном після землетрусу (ЗТ). Відзначимо, що вибір роботи досить випадковий і швидше обумовлений широким поданням у цій роботі не лише кінцевих результатів, а й вихідних даних, що дає можливість зробити власні висновки. На рис. 1 відтворено один з рисунків, а саме рис. 4 цієї статті. Ізобаричні рівні 200 і 400 гПа приблизно відповідають висотам 12 і 7 км, при цьому один з них знаходиться вище тропопаузи, інший – нижче.



Рис. 1. Графік змін температури атмосфери на ізобаричних рівнях 200 і 400 гПа в епіцентральної області землетрусу в Туві [8]

Автори відзначають протилежність зміни атмосферного тиску і, як наслідок, температури на двох ізобаричних рівнях після ЗТ (починаючи з 23 грудня, тобто

включаючи провісники ЗТ), які пояснюються приходом на ці висоти акустико-гравітаційної хвилі (АГХ), яка на межі двох шарів атмосфери (тропопаузи) породжує

внутрішню гравітаційну хвилю (ВГХ), коливання в якій протифазне вихідної хвилі. На думку авторів, до 23 грудня кореляція температури на двох рівнях була низькою. Навпаки (цитата), “з 3 по 29 січня графіки на рис. 4 майже дзеркально відображають один одного, $R = -0.92$. Таким чином, січень – період найбільш інтенсивного генерування АГХ і ВГХ під час останніх землетрусів у Туві.”

З такими висновками важко погодитися. По-перше, протифазні зміни температури на двох ізобаричних рівнях добре помітні і у грудні, нехай і на тлі деякого додаткового тренду. По-друге, не ясно, на якій підставі протифазні зміни температури з 3 по 29 січня приписані впливу сейсмічної активності, тобто через 7 – 33 діб після ЗТ, тим більше що після другого ЗТ практично такої самої магнітуди подібного ефекту не спостерігається.

Якщо ж переглянути графік від початку до кінця, легко переконатися, що протягом всього періоду спостереження, з 1 грудня 2011 р. по 7 березня 2012 р. мала місце досить виражена безперервна протифазність у зміні температури на двох ізобаричних рівнях, можливо, модульована сейсмічним ефектом у перші кілька днів після ЗТ.

Таким чином, можна припустити, що протягом всього розглянутого періоду безперервно або майже безперервно здійснювався зв'язок процесів у тропосфері і стратосфері за допомогою АГХ та ВГХ. Тому реальність епізодичного впливу ЗТ на тлі процесів іншої природи може бути підтверджена лише на основі статистичного аналізу великого числа подій. Джерелом безперервної хвильової активності можуть бути власно тропосферні процеси (фронти погоди, нестійкості та ін.).

Постановка задачі про тривалий чи

навіть безперервний вплив нижньої атмосфери на верхню атмосферу та іоносферу виправдана також деякими результатами, отриманими при аналізі довготних варіацій атмосферних та іоносферних параметрів. Як відомо, глобальні моделі верхньої атмосфери та іоносфери традиційно будувалися у координатах висота, місцевий час і широта, тобто приймалося, що зміни параметрів верхньої атмосфери та іоносфери за довготою є незначними. Однак результати експериментальних вимірювань не підтверджують таке припущення. Показано наявність значних довготних варіацій основних іоносферних характеристик на висотах області F2, при цьому градієнти електронної концентрації іоносфери за довготою можуть бути порівняні за величиною з широтними варіаціями, зумовленими зміною зенітного кута Сонця [2, 5, 7–9].

Розрахунки за теоретичними і гібридними моделями показали (див., наприклад, [9, 10]), що довготні ефекти іоносферних параметрів визначаються переважно змінами швидкості вертикального перенесення, зумовленими безперервною зміною величин магнітного нахилення та схилення через незбіг географічного та геомагнітного полюсів Землі, а також довготними змінами швидкості нейтрального вітру. Відзначимо, що істотна і безперервна залежність параметрів вітрового поля верхньої атмосфери (як мінімум її нижній частині) від довготи (незональність вітрового поля в нижній термосфері) у наш час добре відома (див., наприклад, [11]). Відзначають також залежність характеристик планетарних, припливних та гравітаційних хвиль, що поширюються вгору, від довготи [3, 7, 11]. Увесь цей комплекс процесів є

вагомою підставою для розгляду динаміки верхньої атмосфери та іоносфери як невід'ємної частину кліматології атмосфери в цілому [12].

Аналіз тривалого (безперервного) впливу на іоносферу “знизу” на тлі безперервного сильного впливу космічної погоди можливий з використанням двох підходів: 1) на основі статистичного аналізу великого числа повторюваних подій; 2) на основі аналізу довготних варіацій атмосферних та іоносферних параметрів. Суть другого підходу полягає в тому, що джерела впливу “зверху” симетричні (хвильове випромінювання) або квазісиметричні (корпускулярне випромінювання та процеси перенесення, обумовлені незбігом географічного та геомагнітного полюсів) і без термосферних ефектів, обумовлених процесами в нижчих шарах атмосфери, не можуть створювати значних довготних градієнтів іоносферних параметрів на середніх широтах. Вибір середніх широт додатково знижує роль космічної погоди в змінах іоносфери за довготою. Тропосферні та літосферні процеси, навпаки, просторово неоднорідні, що полегшує прояв їх ефектів в іоносферних параметрах на різних довготах. Оскільки розглядаються довготривалі ефекти, можна припустити, що вони проявляються не лише в окремі періоди, але й в середніх показниках (за місяць, за сезон). Необхідно мати на увазі можливість зміни характеру атмосферно-іоносферних зв'язків у різні сезони, тому дослідження краще проводити для різних сезонів окремо.

Мета роботи – пошук і аналіз довготривалих довготних ефектів середньоширотної іоносфери у зимовий сезон та їх можливий зв'язок з процесами у нижній атмосфері.

2. Дані й методи аналізу

Для більш надійного виділення довготних варіацій доцільно перейти від аналізу даних окремих станцій до аналізу карт іоносферних і атмосферних характеристик уздовж певних довгот. Як характеристику іоносферних процесів зручно використовувати дані про повний електронний вміст (ПЕВ) у вертикальному стовпі іоносфери (N_0), отриманих за вимірюваннями сигналів навігаційних супутників на похилих трасах, що дозволяє будувати глобальні карти ПЕВ не лише над сушею, а й акваторією без використання інтерполяції. У цій роботі використані глобальні карти ПЕВ – *Global Ionospheric Maps*. Карты ПЕВ будуються з вузлами сітки з кроком 2.5° по широті, 5° по довготі і 1 – 2 (залежно від року спостереження) години за часом. Дані картографування у вигляді щодобових таблиць доступні на сайті <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>.

Для аналізу довготних ефектів ПЕВ використані дані для зимового сезону: грудень – січень 2012 – 2018 рр. (від максимуму до мінімуму 24-го сонячного циклу) на широті 40° пн. ш., яка в рівній мірі віддалена як від авроральної, так і екваторіальної зон іоносфери. Для виключення залежності ПЕВ від часу доби використано середньодобові значення. Нижче значення ПЕВ наведені в одиницях $0.1 \text{ TECU} = 10^{15} \text{ м}^{-2}$.

Для оцінки процесів у нижній атмосфері використані карти (gridded data) приведені до рівня моря атмосферного тиску (P_0) і температури атмосфери (T) на рівні 1000 гПа з метеорологічного сайту <https://psn.noaa.gov> на широті 40° пн. ш.

Для виділення впливу нижньої атмосфери на іоносферу на тлі безперервно діючих факторів космічної погоди,

використані дані про сонячну (густина потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$) і геомагнітної (індекс A_p) активностей з сайту <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/>.

За основу для аналізу використано середні за зимовий сезон (грудень – січень) варіації розглянутих показників.

3. Результати

Середні за сезон варіації як іоносферних, так і атмосферних показників виявилися достатньо сталими, тому розглянемо їх на прикладі умов, що відносяться до максимуму циклу сонячної активності (сезон 2012/13 р.). Зміни ПЕВ (середні за добу значення) від доби до доби демонструють сильну залежність від сонячної та геомагнітної активностей (СА та ГМА) – див. рис. 2: наведено приклад сезону 2012/13 року. Видно, що ПЕВ реагує підвищенням навіть на незначне посилення ГМА, що не класифікується як геомагнітна буря (ГМБ): слабку ГМБ (клас G1) фіксують, починаючи з $K_p = 5$ ($A_p = 39$) [13]. Природа цього явища добре відома. Фоновий вітер, який на іоносферних висотах спрямований від екватора до полюса, опускає іоносферну плазму вниз уздовж силових ліній магнітного поля. Посилення ГМА (як бачимо, навіть найменше) призводить до появи складової вітру до екватора. Це призводить спочатку до зменшення фонового вітру, спрямованого до полюса, а при сильному збуренні – ГМБ – навіть до повороту результуючого вітру до екватору. Результатом цього процесу є підйом іоносферної плазми до висот, де швидкість рекомбінації іонізованих частинок нижче, що і призводить до зростання електронної концентрації в області F2. Також добре відомо (див., наприклад, [14]), що в ПЕВ цей ефект виражений значно сильніше, ніж в електронній концентрації поблизу

максимуму іонізації області F2 за рахунок внеску в ПЕВ процесів вище головного максимуму іонізації.

На тлі такого сильного впливу космічної погоди на ПЕВ вплив “знизу” (див. для порівняння графік зміни середнього за добу атмосферного тиску P_0) не очевидні.

Звертає на себе увагу (див. рис. 2), що зміни P_0 мають очевидну подібність із змінами СА; особливо це помітно після усереднення P_0 (пунктир). Аналогічний зв'язок між P_0 та СА простежується у половині розглянутих сезонів. У двох випадках зв'язок P_0 і СА не є очевидним (слабо позитивна кореляція), в одному випадку зв'язок слабо негативний.

На відміну від часових варіацій, зовсім інша ситуація спостерігається для довготних варіацій іоносферних та атмосферних характеристик (довготні варіації космічної погоди позбавлені сенсу): і варіації ПЕВ, і варіації P_0 на географічній широті 40° пн. ш. демонструють три довготні максимуми, два з яких більш виражені. Як приклад, на рис. 3 наведені результати сезону 2012/13 року. Зазначені максимуми P_0 є проявом трьох добре відомих субтропічних центрів підвищеного тиску: Атлантичний (Азорський), Азіатський (Сибірський), Північно-Тихоокеанський (Гавайський). Як на наведених прикладах, так й в інші роки зв'язок між ПЕВ і P_0 вище, якщо проводити їх порівняння зі зміщенням до 40 градусів за довготою (максимуми ПЕВ зміщені на захід по відношенню до максимумів P_0). У цьому випадку зв'язок змін ПЕВ і P_0 характеризуються достовірними ($p < 0.05$) коефіцієнтами кореляції R від $+0.34$ до $+0.48$ у розглянуті сезони. Зміни температури за довготою також значні, а зв'язок з ПЕВ (негативний) проявляється також зі зміщенням по довготі близько 40 градусів.

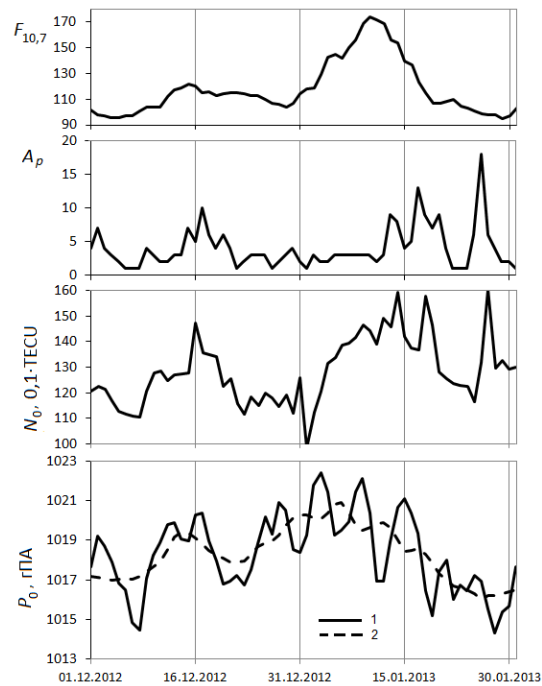


Рис. 2. Зміни СА, ГМА, ПЕВ та P_0 (1 – щоденні значення, 2 – усереднені по 9 днях) взимку 2012/13 р.

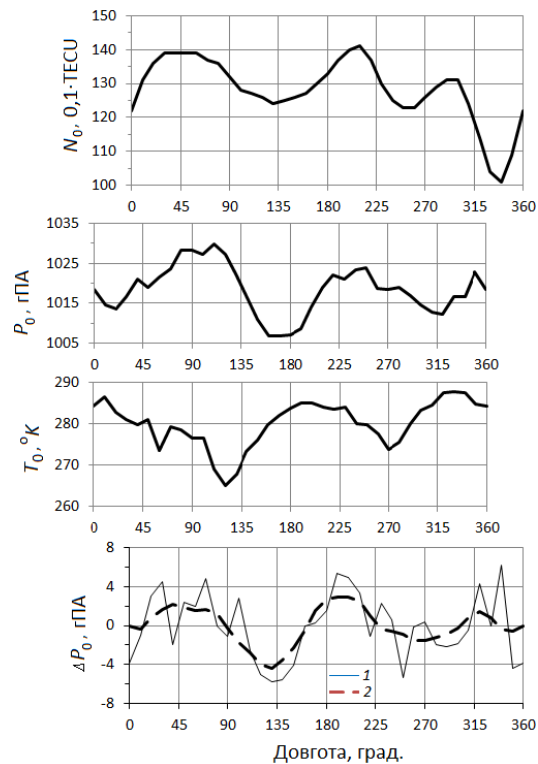


Рис. 3. Середні за сезон 2012/13 р. варіації іоносферних та атмосферних показників (зверху вниз): ПЕВ, приземного тиску, температури та градієнт тиску: 1 – розрахунок; 2 – згладжений по 5 точках.

Отримані результати зовсім не означають, що атмосферні збурення піднімається вгору з таким значним зміщенням. Як відомо, джерелами атмосферних хвиль є різного роду неоднорідності (неоднорідності рельєфу, межа суші та водної поверхні, атмосферні фронти та ін.), на яких відбуваються швидкі зміни тиску, температури та інших атмосферних параметрів. Відповідно, і в нашому випадку найбільшого впливу на іоносферу слід очікувати в місцях найбільш швидкої зміни стану приземної атмосфери. У найпростішому випадку, розглянемо градієнт тиску (ΔP_0) за довготою (нижній графік на рис. 3). Видно, що положення довготних максимумів ΔP_0 і ПЕВ виявилися дуже близькі. Для розглянутого випадку кореляція між варіаціями ΔP_0 і ПЕВ по довготі становить $R = +0.31$, для інших років вона досягає значень $R = +0.45$ ($p < 0.05$). Беручи до уваги, що ми використовували найпростіший індикатор неоднорідності нижньої атмосфери, який лише частково відображає складні атмосферні процеси, така величина кореляції є достатньою для підтвердження атмосферно-іоносферних

зв'язків. Більш суттєвим є те, що характер зв'язку є однотипним за все розглянуті роки, що вказує на її не випадковий характер.

Ми вже відзначали, що вплив ГМА на іоносферу не є симетричним по відношенню до географічних широт. Максимальна різниця географічних і геомагнітних координат спостерігається на довготі близько 213° (2012 р.) Щоб оцінити ступінь цієї асиметрії, були розраховані середні довготні варіації при низькому рівні ГМА ($A_p < 10$) і при найбільш високому рівні ГМА ($A_p > 15$) з тих, що спостерігалися за всі розглянуті сезони. Результати розрахунку показані на рис. 4. Видно, що довготні зміни ПЕВ очікувані: при підвищенні ГМА значення ПЕВ у більшій мірі зростають (приблизно до 25 %) на більш високих геомагнітних широтах, тоді як на більш низьких геомагнітних широтах зростання ПЕВ становить близько 10 %. Не беручи до уваги незначні флуктуації, маємо один широкий максимум та один широкий мінімум. Тобто, вплив ГМА на іоносферу в умовах незбігу географічного та геомагнітного полюсів Землі не може зумовити довготні варіації ПЕВ з кількома максимумами.

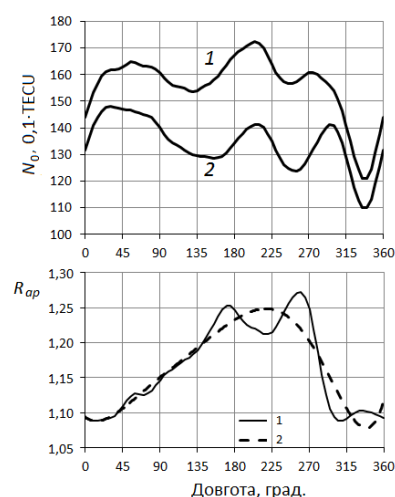


Рис. 4. Середні довготні варіації ПЕВ при високому (1) і низькому (2) рівнях геомагнітної активності (верхня панель) та їх відношення (нижня панель):

1 – розрахунок; 2 – згладжений по 5 точках.

4. Обговорення

Як вже відзначалося [9, 10], джерелом довготних ефектів ПЕВ є два основних фактора – незбіг географічного та геомагнітного полюсів Землі та довготі зміни параметрів нейтральної атмосфери. Оскільки перший чинник не може привести до наявності кількох довготних максимумів ПЕВ, основним джерелом довготних варіацій ПЕВ слід вважати наслідком постійного або достатньо частого надходження енергії з нижніх шарів атмосфери. На відміну від потужних локальних явищ, їх джерелом можуть бути, насамперед, власно тропосферні процеси (нестійкості різної природи), частково приурочені до неоднорідностей рельєфу та сталих особливостей атмосферної циркуляції. Можливо, в подальшому для дослідження атмосферно-іоносферних зв'язків доцільно використати добре відомі індекси нестійкості атмосфери.

Враховуючи сталість довготних екстремумів ПЕВ, можна припустити важливу роль стаціонарних планетарних хвиль [16] у перенесенні енергії збурення вверх. Враховуючи залежність характеристик планетарних, припливних та гравітаційних хвиль, що поширюються вгору, від довготи [3, 7, 11], можна очікувати, що навіть подібні за природою та інтенсивністю збурення у нижній іоносфері можуть спричинити в іоносферні збурення різної амплітуди на різних довготах.

Вважаємо за доцільним згадати ще один результат, який також стосується зв'язку між геосферами протягом тривалого часу. В роботі [17] показано, що поля приземного тиску у ХХ столітті добре збігаються з модулем повного вектора геомагнітного поля. Більше того, цей зв'язок простежується по окремих десятиліттях, тобто

спостерігається подібність просторово-часової структури баричного та геомагнітного полів. За палеоданими також простежено зв'язок між положенням північного полюса Землі та клімату [18]. На думку авторів згаданих робіт, механізми зв'язку можуть бути пов'язані зі здатністю магнітного поля Землі не лише модулювати потоки заряджених частинок з космосу, але й впорядковувати стоки цих частинок з магнітосфери в атмосферу та “закріплювати” їх в районі світових магнітних аномалій [19].

З урахуванням наших результатів та результатів [17, 18], а також беручи до уваги залежність характеристик магнітного поля Землі як від навколоземного простору (насамперед, сонячної активності), так і від властивостей і внутрішньої будови Землі, отримуємо наявність тривалих зв'язків між Землею, її оболонками та геокосмосом. Наслідком цих зв'язків можуть бути як співпадаючі чи близькі просторові аномалії, так і синхронізовані у часі [19] процеси у різних оболонках Землі. Це свідчить про доцільність підходу до системи Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (внутрішні оболонки) як єдиної відкритої нелінійної системи [20], в якій навіть малі зовнішні впливи або зміни в одній із підсистем можуть супроводжуватись помітними (з урахуванням тригерних ефектів) змінами параметрів системи.

5. Висновки

1. Для зимових сезонів 2012 – 2018 років (від максимуму до мінімуму 24-го сонячного циклу) на середніх широтах північної півкулі встановлено значні (до 40 %) від середнього значення) постійно існуючі довготні варіації повного електронного вмісту іоносфери, що корелюють зі змінами приземного тиску і

температури. Зв'язок характеризується достовірними коефіцієнтами кореляції від +0.34 до +0.48 у розглянуті сезони.

2. Максимуми ПЕВ припадають на довготи з максимальними градієнтами приземного атмосферного тиску. Вплив космічної погоди через незбіг географічної та геомагнітної систем координат також призводить до довготних ефектів ПЕВ, але без формування локальних екстремумів.

3. Джерелом тривалого впливу нижніх шарів атмосфери на іоносферу можуть бути нестійкості різної природи, що притаманні атмосферним процесам.

Автор висловлює щире подяку проф. Л. Ф. Чорногору за корисне обговорення роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Ann. Geophysicae*. 1996. Vol. 14. P. 917–940. doi: 10.1007/s005850050357.
- Rishbeth H. F-region links with the low atmosphere? *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. Vol. 68. P. 469–478. doi: 10.1016/j.jastp.2005.03.017.
- Kazimirovsky E. S., Manson A. H., Meek C. E. Winds and waves in the middle atmosphere at Saskatoon (52°N, 107°W), Collm (52°N, 15°E) and Badary (52°N, 105°E). *J. Atmos. Terr. Phys.* 1988. Vol. 50, No. 3. P. 243–250. doi: 10.1016/0021-9169(88)90073-6.
- Forbes J. M., Palo S. E., Zhang X. Variability of the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. Vol. 62. P. 685–693. doi: 10.1016/s1364-6826(00)00029-8.
- Laštovička J. Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009. Vol. 71, No. 14–15. P. 1514–1528. doi: 10.1016/j.jastp.2009.01.010.
- Кашкин В. Б., Романов А. А., Григорьев А. С., Баскова А. А. Тропосферные эффекты землетрясений в Туве, наблюдаемые с искусственных спутников земли. *J. Siberian Federal Un-ty. Engineering & Technologies*. 2012. Vol. 5, No. 2. P. 220–228.
- Шпынев Б. Г., Черниговская М. А., Куркин В. И., Ратовский К. Г., Белинская А. Ю., Степанов А. Е., Бычков В. В., Григорьева С. А., Панченко В. А., Коренькова Н. А., Лещенко В. С., Мелич Й. Пространственные вариации параметров ионосферы северного полушария над зимними струйными течениями. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 4. С. 204–215. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-204-215.
- Thomas J. O., Rycroft M. J., Colin L. Electron densities and scale height in the topside ionosphere: Alouett-1 observations in midlatitudes. Scientific and Technical Information Division, NASA, 1976.
- Карпачев А. Т. Глобальный долготный эффект в ночной внешней ионосфере по данным ИСЗ “Интеркосмос-19”. *Препринт ИЗМИРАН СССР*. 1987. № 45. 734 с.
- Ишанов С. А., Зинин Л. В., Клевцур С. В., Мациевский С. В., Савельев В. И. Моделирование долготных вариаций параметров ионосферы Земли. *Матем. моделирование*. 2016. Т. 28, № 3. С. 64–78.
- Kazimirovsky E. S., Vergasova G. V. The non-zonal effect in the dynamical structure of the midlatitude MLT-region. *Adv. Space Res.* 2001. Vol. 27, No. 10. P. 1673–1678. doi: 10.1016/s0273-1177(01)00233-2.
- Вергасова Г. В., Кокоуров В. Д., Казимировский Э. С. Динамика ионосферы как часть климатологии атмосферы. *Научно-техническая библиотека SciTecLibrary*. URL: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8002.html>. (дата обращения: 28.12.2021).
- Palacios J., Guerrero A, Cid C., Saiz E., and Cerrato Y. Defining scale thresholds for geomagnetic storms through statistics. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* April 2018. 17 p. doi: 10.5194/nhess-2018-92.
- Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Review of Geophysics*. 2006. Vol. 44, No. 4. doi: 10.1029/2005RG000193.
- Kawahira K. Global Structures of Stationary Planetary Waves in the Middle Atmosphere. *J. Meteorol. Society of Japan. Ser. II*. 1983. Vol. 61, No. 5. P. 695–716. doi: 10.2151/jmsj1965.61.5_695.
- Kilifarska N. A., Bakhmutov V. G., Mel'nik G. V. Geomagnetic Field and Climate: Causal Relations with Some Atmospheric Variables. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2015. Vol. 51, No. 5. P. 768–785. doi: 10.1134/S1069351315050067.
- Бахмутов В. Г. Палеогеомагнитные вариации. Киев: Наук. думка, 2006. 298 с.

18. Витинский Ю. И., Оль А. И., Сазонов Б. И. Солнце и атмосфера Земли. Л.: Гидрометеониздат, 1976. 351 с.
19. Zakharov I. G., Chernogor L. F. Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018. Vol. 58, No. 3. P. 430–437. doi: 10.1134/S0016793218030167.
20. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2003. Т. 8, № 1. С. 59–106.

REFERENCES

1. Hocke, K., Schlegel, K. (1996). A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Ann. Geophysicae*, 14, 917–940. doi: 10.1007/s005850050357.
2. Rishbeth, H. (2006). F-region links with the low atmosphere? *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 68, 469–478. doi: 10.1016/j.jastp.2005.03.017.
3. Kazimirovsky, E. S., Manson, A. H., & Meek, C. E. (1988). Winds and waves in the middle atmosphere at Saskatoon (52°N, 107°W), Collm (52°N, 15°E) and Badary (52°N, 105°E). *J. Atmos. Terr. Phys.*, 50(3), 243–250. doi: 10.1016/0021-9169(88)90073-6.
4. Forbes, J. M., Palo, S. E., & Zhang, X. (2000). Variability of the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 62, 685–693. doi: 10.1016/s1364-6826(00)00029-8.
5. Laštovička, J. (2009). Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 71(14–15), 1514–1528. doi: 10.1016/j.jastp.2009.01.010.
6. Kashkin, V. B., Romanov, A. A., Grigoriev, A. S., & Baskova, A. A. (2012). Tropospheric effects of earthquakes in Tuva observed from artificial Earth satellites. *J. of Siberian Federal Un-ty, Engineering & Technologies*, 5 (2), 220–228.
7. Shpynev, B. G., Chernigovskaya, M. A., Kurkin, V. I., Ratovsky, K. G., Belinskaya, A. Yu., Stepanov, A. E., Bychkov, V. V., Grigorieva, S. A., Panchenko, V. A., Korenkova, N. A., Leshchenko, V. S., & Melich, J. (2016). Spatial variations in the parameters of the ionosphere of the northern hemisphere over winter jet streams. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 13(4), 204–215. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-204-215.
8. Thomas, J. O., Rycroft, M. J., & Colin, L. Electron densities and scale height in the topside ionosphere: Alouett-1 observations in midlatitudes. Scientific and Technical Information Division, NASA, 1976.
9. Karpachev, A. T. (1987). Global longitudinal effect in the outer night ionosphere according to data from the satellite "Interkosmos-19". Preprint of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and radio Wave Propagation, USSR, 45, 734 p.
10. Ishanov, S. A., Zinin, L. V., Klevtsov, S. V., Matsievsky, S. V., & Savelyev, V. I. (2016). Modeling of longitudinal variations in the parameters of the Earth's ionosphere. *Mathematical modeling*, 28 (3), 64–78.
11. Kazimirovsky, E. S., Vergasova, G. V. (2001). The non-zonal effect in the dynamical structure of the midlatitude MLT-region. *Adv. Space Res.*, 27(10), 1673–1678. doi: 10.1016/s0273-1177(01)00233-2.
12. Vergasova, G. V., Kokourov, V. D., & Kazimirovsky, E. S. (2005). Ionospheric dynamics as part of atmospheric climatology. Scientific and technical library SciTecLibrary. <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8002.html>.
13. Palacios, J., Guerrero, A., Cid, C., Saiz, E., & Cerrato, Y. (2018). Defining scale thresholds for geomagnetic storms through statistics. doi: 10.5194/nhess-2018-92.
14. Mendillo, M. (2006). Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Review of Geophysics*, 44(4). doi: 10.1029/2005RG000193.
15. Kawahira, K. (1983). Global Structures of Stationary Planetary Waves in the Middle Atmosphere. *J. Meteorol. Society of Japan. Ser. II*, 61(5), 695–716. doi: 10.2151/jmsj1965.61.5_695.
16. Kilifarska, N. A., Bakhmutov, V. G., & Mel'nik, G. V. (2015). Geomagnetic Field and Climate: Causal Relations with Some Atmospheric Variables. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 51(5), 768–785. doi: 10.1134/S1069351315050067.
17. Bakhmutov, V. G. (2006). Paleo-Age Geomagnetic Variations, *Naukova Dumka, Kyiv*, 298 p.
18. Vitinsky, Yu. I., Ol, A. I., & Sazonov, B. I. (1976). *The Sun and the Earth's Atmosphere*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 351 p.
19. Zakharov, I. G., Chernogor, L. F. (2018). Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, 58(3), 430–437. doi: 10.1134/S0016793218030167.
20. Черногор, Л. Ф. (2003). Physics of the Earth, atmosphere and geocosmos in the view of the system

paradigm. Radiophysics and Radio Astronomy, 8 (1), 59–106.

Influence of Lower Atmosphere on Long-Term Total Electron Content Variations of Mid-latitude Ionosphere in Winter Seasons 2012 – 2018

I. G. Zakharov

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Background. In recent decades, new results on the influence of powerful meteorological processes on the ionosphere have been obtained. At the same time, the possibility of tropospheric-ionospheric interaction outside the disturbed periods remains unclear, which is important for assessing the energy of the phenomenon and for modeling the dynamic processes of the lower and upper atmosphere as a single self-organizing system. In this work, for the first time, the possibility of the influence of the lower atmosphere on the median values of ionospheric parameters against the background of processes caused by space weather is considered.

An objective of the work is to search and analyze long-term longitudinal effects of the mid-latitude ionosphere in the winter season and their possible connection with processes in the lower atmosphere.

Materials and methods. The studies were carried out using daily data for the winter seasons of 2012 – 2018 at latitude of 40°N on the basis of maps of ionospheric total electron content obtained using the global network of navigation satellites and global maps of pressure and temperature of the surface atmosphere. Data on space weather and the magnetosphere (indices of solar and geomagnetic activity) were also used. Statistical analysis methods were used.

Results. Significant (up to 40 % of the average level) permanently existing longitudinal extrema of the ionospheric total electron content have been established, which correlate with changes in the pressure and temperature of the surface atmosphere. The relationship is characterized by significant correlation coefficients from +0.34 to +0.48 in the seasons under consideration. The total electron content maxima fall on longitudes with maximum surface atmospheric pressure gradients. The influence of space weather through the mismatch between the geographic and geomagnetic coordinate systems also leads to longitudinal effects in the ionosphere, but without

the formation of local extrema.

Conclusions. The results obtained indicate the possibility of long-term or continuous interaction of the lower atmosphere with the higher layers of the atmosphere and the ionosphere. Taking into account the constant nature of the longitudinal features of the total electron content, an assumption was made about the important role of stationary planetary waves in the implementation of atmospheric-ionospheric interactions.

Key words: total electron content of the ionosphere, longitudinal effects, atmospheric-ionospheric coupling.

Влияние нижней атмосферы на долготные вариации полного электронного содержания среднеширотной ионосферы в зимние сезоны 2012 – 2018 годов

И. Г. Захаров

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина

Актуальность. В последние десятилетия получены новые результаты о влиянии мощных метеорологических процессов на ионосферу. В то же время, остается невыясненной возможность тропосферно-ионосферного взаимодействия за пределами возмущенных периодов, что имеет важное значение для оценки энергетики явления и для моделирования динамических процессов нижней и верхней атмосферы как единой самоорганизующейся системы. В работе впервые рассмотрена возможность влияния нижней атмосферы на медианные значения ионосферных параметров на фоне процессов, обусловленных космической погодой.

Цель работы – поиск и анализ продолжительных долготных эффектов среднеширотной ионосферы в зимний сезон и их возможной связи с процессами в нижней атмосфере.

Материалы и методы. Исследования проведены с использованием ежедневных данных за зимние сезоны 2012 – 2018 годов на широте 40° с.ш. на основе карт полного электронного содержания ионосферы, полученных с использованием глобальной сети навигационных спутников, и глобальных карт давления и температуры приземной атмосферы. Использованы также данные о космической погоде и магнитосферу (индексы солнечной и геомагнитной активности). Использованы статистические методы анализа.

Результаты. Установлены значительные (до 40 % от среднего уровня) постоянно существующие долготные экстремумы полного электронного содержания ионосферы, коррелирующие с изменениями давления и температуры приземной атмосферы. Связь характеризуется достоверными коэффициентами корреляции от +0.34 до +0.48 в рассмотренные сезоны. Максимумы полного электронного содержания приходятся на долготы с максимальными градиентами приземного атмосферного давления. Влияние космической погоды через несовпадение географической и геомагнитной систем координат также приводит к долготным эффектам в ионосфере, но без формирования локальных экстремумов.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о возможности длительного или непрерывного взаимодействия нижней атмосферы с расположенными выше слоями атмосферы и ионосферой. Учитывая постоянный характер долготных особенностей полного электронного содержания, сделано предположение о важной роли стационарных планетарных волн в реализации атмосферно-ионосферных связей.

Ключевые слова: полное электронное содержание ионосферы, долготные эффекты, атмосферно-ионосферное взаимодействие.

Стаття надійшла до редакції 08.11.2021