

<https://doi.org/10.15407/knit2024.01.044>  
УДК 629.783, 550.388

**В. В. КОЛОДЯЖНИЙ**<sup>1,2</sup>, мол. наук. співроб., аспірант

E-mail: Vyacheslav.Kolodyazhnyi@infiz.khpi.edu.ua

**М. В. ЛЯШЕНКО**<sup>1</sup>, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

E-mail: intercosmos80@gmail.com

**Л. Я. ЄМЕЛЬЯНОВ**<sup>1</sup>, пров. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.

E-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com

**Д. А. ДЗЮБАНОВ**<sup>2</sup>, проф., канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.

E-mail: Dmytro.Dziubanov@khpi.edu.ua

<sup>1</sup> Інститут іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України  
вул. Кирпичова 16, Харків, Україна, 61001

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Кирпичова 2, Харків, Україна, 61001

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ ВАРІАЦІЙ ПАРАМЕТРІВ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ІОНОСФЕРНІЙ ПЛАЗМІ НАД УКРАЇНОЮ НА ФАЗІ МАКСИМУМУ 24-ГО ЦИКЛУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ (2012—2015 рр.)

*Об'єктом дослідження є фізичні процеси, що відбуваються в іоносферній плазмі. Предмет дослідження: просторово-часові залежності основних параметрів іоносферної плазми, отримані за допомогою радара некогерентного розсіяння. Методи дослідження охоплюють наземний радіофізичний метод некогерентного розсіяння радіохвиль, статистичний аналіз результатів спостереження та напівемпіричне моделювання параметрів динамічних і теплових процесів.*

*Виконано моделювання та аналіз просторово-часових варіацій параметрів динамічних і теплових процесів у іоносфері на фазі максимуму 24-го циклу сонячної активності (2012—2015 рр.) з використанням експериментальних даних харківського радара некогерентного розсіяння. Для періодів рівнодень та сонцестоянь побудовано добові залежності параметрів процесів у іоносферній плазмі на висотах 210...450 км. Отримано значення спричинених амбіполярною дифузією швидкості перенесення плазми та щільності потоку заряджених частинок, а також щільності повного плазмового потоку. Розраховано значення енергії, яка надходить до електронного газу, щільності потоку тепла, що переноситься електронами з плазмосфери до іоносфери, швидкості еквівалентного нейтрального вітру та меридіональної складової швидкості нейтрального вітру.*

*Для розглянутих періодів виявлено, що ефекти варіацій космічної погоди та геомагнітної активності суттєво проявилися у варіаціях щільності потоку плазми за рахунок амбіполярної дифузії, щільності повного потоку плазми, а також енергії, яка підводиться до електрона за одиницю часу. Кількісні та якісні характеристики цих параметрів були типовими, але в деяких випадках істотно змінювалися (у 2...3 рази) навіть у моменти незначного посилення геомагнітної активності.*

**Ключові слова:** іоносфера, моделювання іоносфери, динамічні та теплові процеси в іоносфері, радіофізичні методи дослідження геокосмосу, сонячна активність.

Цитування: Колодяжний В. В., Ляшенко М. В., Ємельянов Л. Я., Дзюбанов Д. А. Моделювання просторово-часових варіацій параметрів фізичних процесів у іоносферній плазмі над Україною на фазі максимуму 24-го циклу сонячної активності (2012—2015 рр.). *Космічна наука і технологія*. 2024. **30**, № 1 (146). С. 44—65. <https://doi.org/10.15407/knit2024.01.044>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## ВСТУП

Дослідження стану іоносфери у періоди високої і низької сонячної активності є підґрунтям для розвинення фундаментальних знань про навколосферний космічний простір. Накопичення й аналіз спостережного матеріалу сприяє розвитку і вдосконаленню наявних моделей іонізованої та нейтральної складових верхньої атмосфери Землі. Особливо інформативним є використання даних, отриманих за допомогою методу некогерентного розсіяння (НР).

Дослідження динаміки іоносфери дозволяють пояснити варіації властивостей геокосмічного середовища при змінах сонячної та геомагнітної активності. До основних процесів у геокосмічній плазмі належать динамічні та теплові процеси, які зумовлюють зміну її властивостей та взаємодію з іншими складовими геокосмосу. Динамічні процеси охоплюють рух плазми та його зміни під впливом зовнішніх факторів, таких як сонячний вітер, магнітні бурі та інші явища, які впливають на розподіл плазми в іоносфері та магнітосфері. Теплові процеси, у свою чергу, визначають розподіл тепла у плазмі та теж впливають на її структуру. Розуміння цих процесів є ключем до вирішення багатьох науково-практичних задач, таких як прогнозування космічної погоди, розвиток комунікаційних технологій та підвищення надійності супутникових систем, що є важливим в контексті сучасних досліджень сонячно-земних зв'язків та геокосмосу [7, 24].

Велику кількість публікацій присвячено вивченню варіацій параметрів іоносферної плазми в різних геліогеофізичних умовах [8, 9, 18, 21, 22, 23, 25, 27, 30]. Зокрема, значна увага приділяється вивченню ефектів унікальних явищ у геокосмічному просторі — сильних геомагнітних бур, сонячних затемнень та інших [10, 14]. Ця робота продовжує дослідження варіацій параметрів фізичних процесів у іоносфері, ґрунтуючись на результатах, отриманих раніше у роботах [1, 3—6, 13, 28], та дає суттєво нові відомості порівняно з даними [3], отриманими у періоди низької активності Сонця. Метою роботи є моделювання просторово-часових варіацій параметрів динамічних і теплових процесів у іоносфері у періоди рівнодень та сонцестоянь

на фазі максимуму 24-го циклу сонячної активності (2012—2015 рр.). Результати розрахунків сприяють подальшому розвитку регіональної моделі іоносфери CERIM ПОН (Central Europe Regional Ionospheric Model) [2, 11], створеної в Інституті іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

## МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ГЕЛІОГЕОФІЗИЧНА ОБСТАНОВКА

Для дослідження іоносфери у глобальному масштабі використовується мережа радарів НР та цифрових іонозондів [17, 19, 26, 29]. Метод НР дозволяє одночасно і в широкому діапазоні висот отримувати дані про основні іоносферні параметри, які характеризують склад земної газової оболонки, а також динамічні та теплові процеси в ній [15, 16]. Серед основних переваг цього методу є можливість його одночасного застосування як вище, так і нижче максимуму іонізації.

Радар НР Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України (далі по тексту харківський радар НР) є основним та найбільш інформативним джерелом даних про параметри геокосмічної плазми в середніх широтах Центральної Європи [12]. Радар забезпечує високу точність і роздільну здатність за висотою під час вимірювання таких параметрів іоносфери: концентрації електронів  $N_e$ , температури електронів  $T_e$ , температури іонів  $T_i$ , вертикальної складової швидкості переносу заряджених частинок  $v_z$  та відносного вмісту іонів  $O^+$ ,  $He^+$ ,  $H^+$ . Для загального контролю стану іоносфери та калібрування отриманого методом НР нормованого висотного профілю концентрації електронів у його максимумі за визначеною критичною частотою шару F2 іоносфери використовується цифровий іонозонд.

Вимірювання параметрів іоносфери за допомогою харківського радара НР виконувалися для періодів, близьких до рівнодень та сонцестоянь на фазі максимуму 24-го циклу сонячної активності. З табл. 1 видно, що розглянуті періоди характеризувалися середньою та високою сонячною активністю та здебільшого спокійними геомагнітними умовами. Значення індексу  $F_{10.7}$

Таблиця 1. Параметри стану космічної погоди для обраних дат

Дата	$F_{10.7}$	$A_p$	$K_p$
<i>Весняне рівнодення</i>			
27.03.2012	106	13	1 2 1 3 3 3 3 4
28.03.2012	107	13	4 4 3 2 2 1 2 1
18.03.2013	118	7	3 2 2 2 1 1 2 2
19.03.2013	110	5	2 1 1 0 0 1 2 2
19.03.2015	109	28	4 4 4 5 5 3 3 4
20.03.2015	113	24	5 3 5 3 3 3 3 5
<i>Літнє сонцестояння</i>			
19.06.2012	110	3	0 1 1 1 1 1 1 1
20.06.2012	104	4	2 2 1 1 1 1 1 1
18.06.2013	125	5	1 1 1 1 1 2 2 1
19.06.2013	123	5	2 1 0 1 1 2 1 2
23.06.2014	93	5	1 1 0 0 1 1 0 3
24.06.2014	94	6	3 3 2 1 1 1 2 1
17.06.2015	136	14	3 3 3 3 4 3 1 1
18.06.2015	151	7	3 2 1 2 2 2 1 1
<i>Осіньне рівнодення</i>			
25.09.2012	140	2	1 0 0 1 1 1 0 0
26.09.2012	139	6	1 1 1 1 2 1 3 2
24.09.2013	110	9	2 1 1 3 4 3 1 1
25.09.2013	111	4	2 2 2 1 1 1 0 1
22.09.2014	130	9	2 3 2 2 3 2 2 2
23.09.2014	138	11	3 2 2 2 3 3 3 3
24.09.2015	107	8	3 3 2 1 1 1 2 2
25.09.2015	120	7	2 2 1 2 3 1 1 1
<i>Зимове сонцестояння</i>			
18.12.2012	116	6	1 2 2 2 2 2 1 1
19.12.2012	113	4	1 2 1 1 1 0 1 1
17.12.2013	159	3	2 1 0 0 0 1 2 1
18.12.2013	156	4	1 1 2 1 0 1 1 2
17.12.2014	192	8	3 3 2 1 1 2 2 1
18.12.2014	213	5	1 1 1 1 1 2 2 2
21.12.2015	122	38	6 6 5 4 3 3 2 3
22.12.2015	130	13	3 3 3 4 2 1 2 2

(потік сонячного радіовипромінювання на хвилі довжиною 10.7 см) коливалися у межах від 93 до 213 одиниць. У період 19—20 березня 2015 р. спостерігалася слабка магнітна буря (планетарний індекс магнітного поля Землі  $K_{p\max} = 5$ ).

Крім цього, 21 грудня 2015 р. відбувалася помірна магнітна буря ( $K_{p\max} = 6$ ).

Теоретичні співвідношення, які використовувалися в цій роботі, наведено в роботах [3—6]. Для розрахунку параметрів динамічних і теплових процесів використовувалися експериментальні дані ( $N_e$ ,  $T_e$ ,  $T_i$  і  $v_z$ ) харківського радара НР. Параметри нейтральної атмосфери розраховувалися за допомогою емпіричної моделі NRLMSISE-00 [20].

### РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Розглянемо просторово-часові залежності параметрів фізичних процесів у іоносфері на фазі максимуму 24-го циклу сонячної активності (2012—2015 рр.).

**1. Вертикальна складова швидкості переносу плазми за рахунок амбіполярної дифузії.** *Весняне та осіннє рівнодення.* Добові варіації швидкості  $v_d$  у періоди весняного та осіннього рівнодень подібні між собою (рис. 1, а, б), оскільки ніч та день на середніх широтах мають приблизно однакову тривалість. Вдень значення  $v_d$  близькі до нуля в діапазоні висот 210...400 км в усі розглянуті роки, у нічні години спостерігалася перенесення плазми вниз ( $v_d < 0$ ). На висоті 210 км швидкість  $v_d$  вночі не перевищувала значень  $-9$  м/с, а на висоті 250 км вона не перевищувала значень  $-15$  м/с. Як для весняного, так і для осіннього рівнодення, значення  $v_d$  збільшувалися зі збільшенням висоти. Основні риси та особливості  $v_d$  на середніх широтах полягають у тому, що вдень значення  $v_d$  зазвичай збільшуються зі збільшенням висоти, а вночі спостерігається перенесення плазми вниз. Висока сонячна активність призводить до збільшення  $v_d$ , оскільки сонячна радіація нагріває іонізований шар іоносфери та стимулює рух частинок. На висоті 350 км вночі  $v_d \approx -30$  м/с. Добові варіації  $v_d$  восени 2015 р. мали певні особливості: на висотах 350...450 км у нічні та ранкові години (00:00—06:00 EEST) значення  $v_d$  майже удвічі перевищували аналогічні показники інших років.

*Зимове та літнє сонцестояння.* Добові варіації  $v_d$  у періоди сонцестоянь наведено на рис. 1, в, г. Як видно з рис. 1, в, форми добових варіацій  $v_d$  на висотах 210...400 км подібні між собою. На

цих висотах спостерігалася перенесення плазми вниз. На висоті 450 км у нічні та ранкові години (00:00—10:00 EEST) у варіаціях  $v_d$  2015 р. спостерігався квазіхвильовий процес з періодом близько 2.5 год, що пов'язано з наявністю хвильових збурень в іоносфері. Опівдні на висотах 210...300 км значення  $v_d$  варіювали від 0 до  $-6$  м/с, у нічні години  $v_d$  не перевищували  $-25$  м/с. На висотах 350...400 км денні значення  $v_d$  змінювалися від 0 до  $-20$  м/с, в нічні години значення  $v_d$  не перевищували  $-40$  м/с. Форми висотних профілів  $v_d$  для зимового сонцестояння (рис. 1, *з*) є типовими для цих умов, але на висотах 300...450 км у денні години спостерігалася зміна знаку ( $v_d > 0$ ), що свідчить про зміну напрямку перенесення заряджених частинок за рахунок амбіполярної дифузії. Слід зазначити, що на висоті 450 км значення швидкості  $v_d$  у 2012 р. в ранкові (05:00—08:00 EEST) та вечірні (20:00—23:00 EEST) години суттєво перевищували аналогічні значення  $v_d$  для 2013—2015 рр.

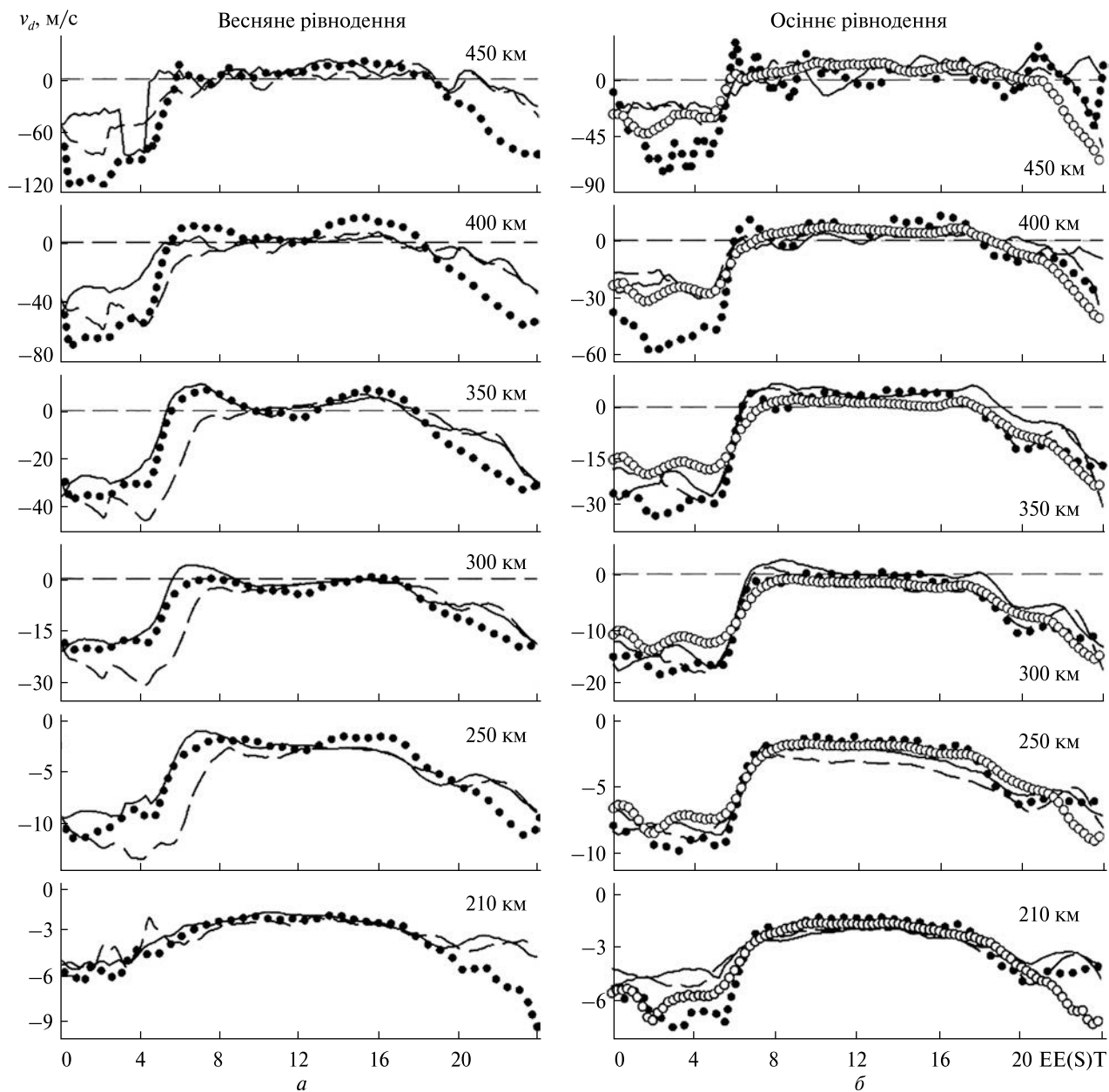
**2. Щільність потоку плазми за рахунок амбіполярної дифузії.** *Весняне та осіннє рівнодення.* На рис. 2, *а, б* представлено добові варіації щільності потоку заряджених частинок за рахунок амбіполярної дифузії у періоди рівнодень у 2012—2015 рр. на фіксованих висотах. Як на весні, так і восени дифузійний потік плазми  $\Pi_d$  на малих висотах практично відсутній, значення  $\Pi_d$  збільшуються зі збільшенням висоти. У денні години на висотах 210, 250 та 300 км значення  $\Pi_d$  у період весняного рівнодення не перевищували  $-1.5 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>,  $-3 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> та  $-4 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> відповідно. У період осіннього рівнодення (рис. 2, *б*) значення  $\Pi_d$  на цих висотах не перевищували  $-2 \cdot 10^{12}$ ,  $-4 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> та  $-5 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> відповідно. У діапазоні висот 350...450 км денні значення  $\Pi_d$  близькі до нуля в усі розглянуті роки. Як і для  $v_d$ , висока сонячна активність призводить до збільшення значень  $\Pi_d$ , оскільки сонячна радіація стимулює іонізацію та утворення іоносферної плазми.

*Зимове та літнє сонцестояння.* У період літнього сонцестояння (рис. 2, *в*) в денні години на висотах 210, 250 та 300 км значення щільності потоку плазми  $\Pi_d$  за рахунок амбіполярної дифузії не перевищували  $-1.5 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>,

$-3 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> та  $-6 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> відповідно. Як і для  $v_d$ , у варіаціях  $\Pi_d$  2015 р. на висоті 450 км в нічні та ранкові години (00:00—10:00 EEST) спостерігався квазіхвильовий процес з періодом близько 2.5 год, а значення  $\Pi_d$  варіювали від  $-16 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> до  $2 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Взимку в діапазоні висот 300...450 км у денні години (08:00—16:00 EEST) спостерігався висхідний потік плазми (рис. 2, *з*). Добові варіації  $\Pi_d$  взимку 2014 р. мали певні особливості. На висотах 210...300 км та 400...450 км у денні години значення  $\Pi_d$  (за модулем) перевищували значення інших років, що пояснюється збуреними геліогеофізичними умовами 18 грудня 2014 р.

**3. Щільність повного потоку плазми.** *Весняне та осіннє рівнодення.* На рис. 3, *а, б* представлено добові варіації щільності повного потоку плазми  $\Pi_p$  в іоносфері у періоди рівнодень у 2012—2015 рр. Як видно з рис. 3, *а*, на висотах 210...400 км впродовж доби спостерігався низхідний потік плазми. Максимальні значення  $\Pi_p$ , які спостерігалися на висотах 210...300 км, варіювали приблизно від  $-40 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> до  $-50 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. На висотах 350...450 км значення  $\Pi_p$  були меншими. У нічні години значення  $\Pi_p$  не перевищували  $-15 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Для осіннього рівнодення (рис. 3, *б*) варіації  $\Pi_p$  за якісними та кількісними характеристиками були подібними до весняних. Максимальні значення  $\Pi_p$  спостерігалися в денні години на висотах 210 та 250 км та становили приблизно  $-60 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Зі збільшенням висоти значення  $\Pi_p$  були меншими. Вночі значення  $\Pi_p$  не перевищували  $-20 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.

*Зимове та літнє сонцестояння.* Добові варіації щільності повного потоку плазми для періодів сонцестоянь наведено на рис. 3, *в, г*. Влітку добові варіації  $\Pi_p$  в усьому висотному діапазоні мали схожий характер часових залежностей. Денні значення  $\Pi_p$  не перевищували  $-30 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. У нічні години на висотах 210 та 250 км значення  $\Pi_p$  варіювали від  $-5 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> до  $-25 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Взимку (рис. 3, *г*) максимальні значення  $\Pi_p$  спостерігалися у ранкові та денні години (10:00—15:00 EEST) та становили  $-90 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> на висотах 210 та 250 км, а також  $-10^{14}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> на висоті 300 км. У висотному діа-



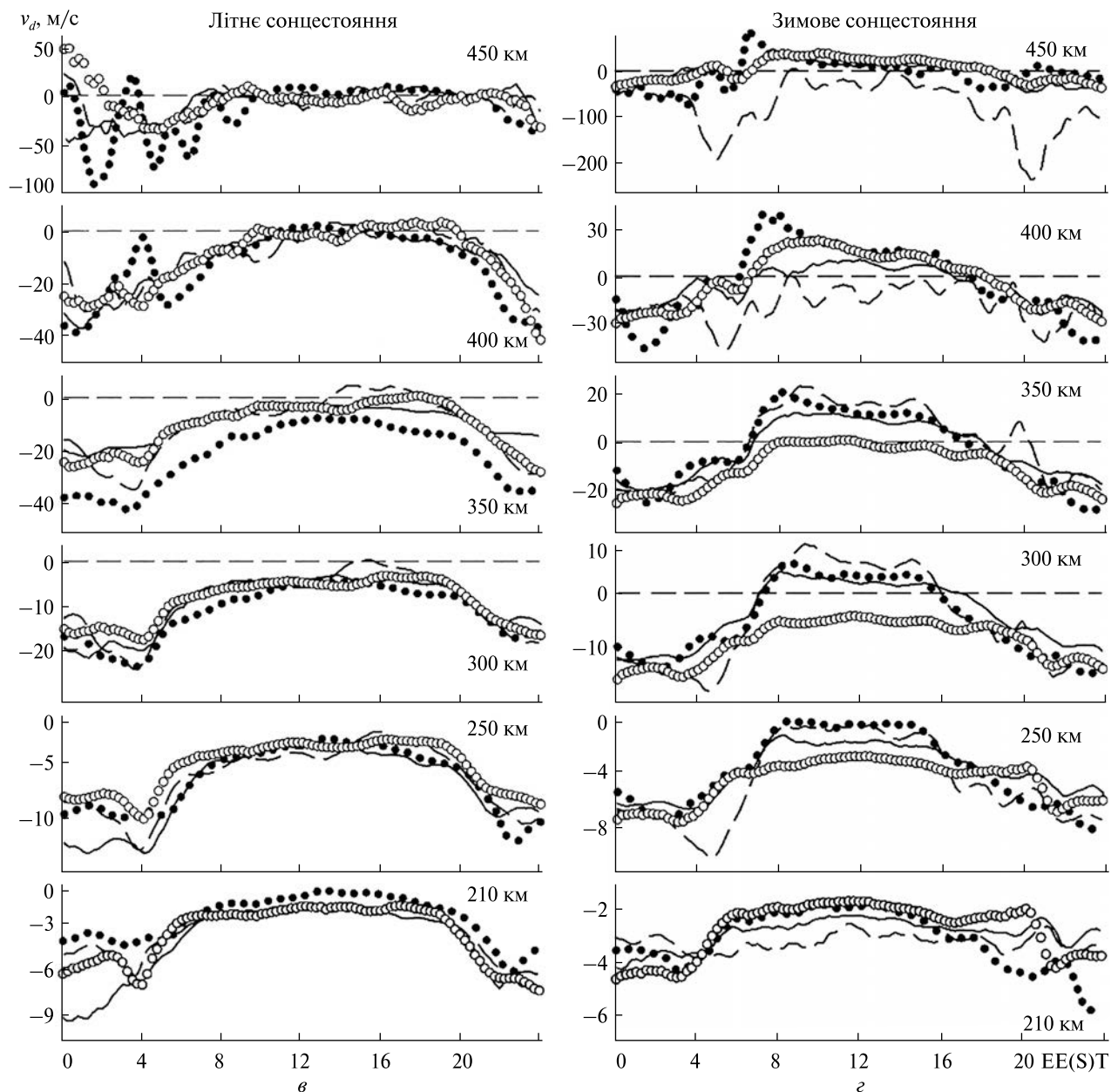
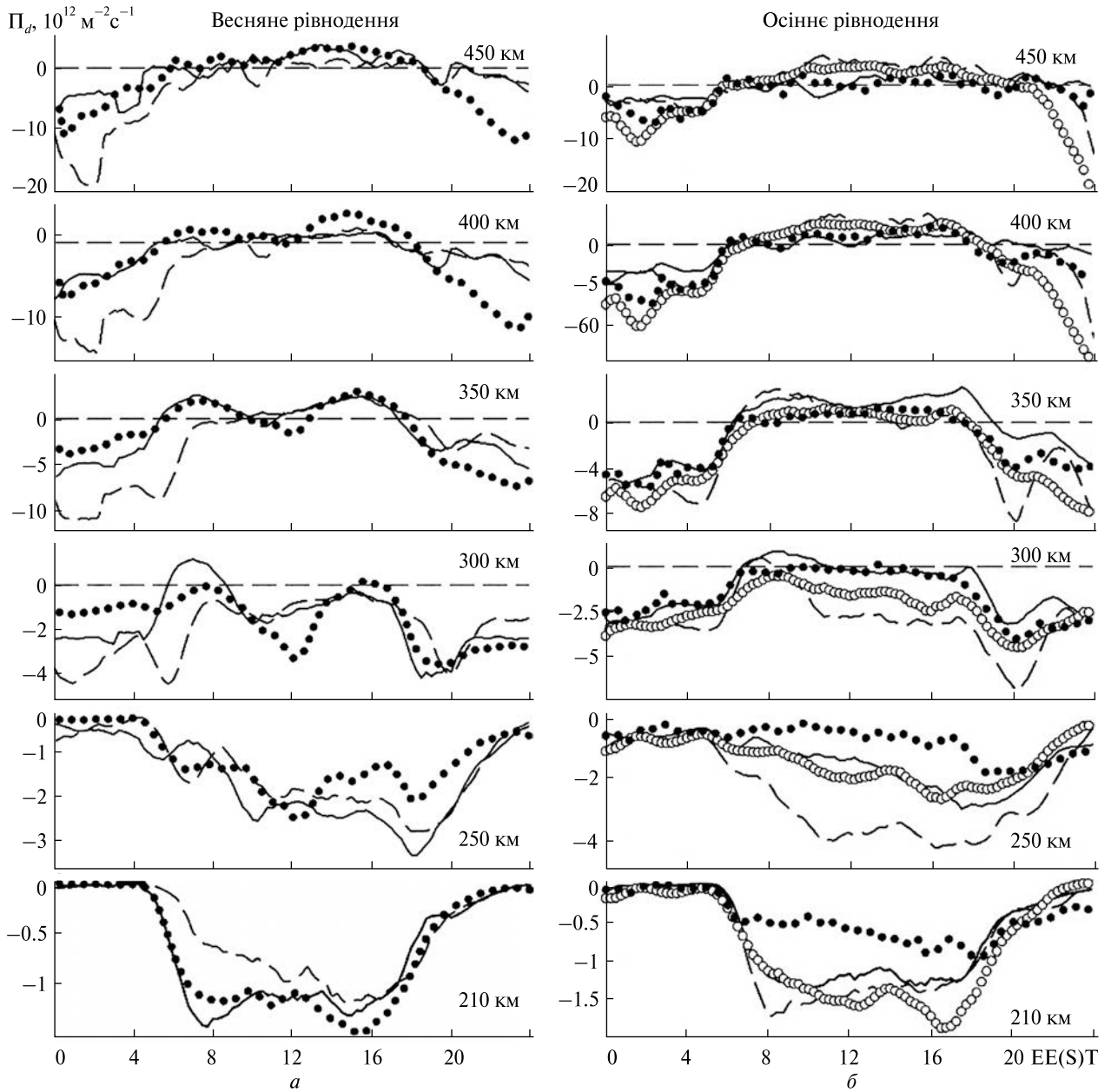


Рис. 1. Добові варіації вертикальної складової швидкості  $v_d$  переносу плазми за рахунок амбіполярної дифузії для періодів: весняного (а) та осіннього (б) рівнодень; літнього (в) та зимового (г) сонцестоянь у 2012 р. (штрихова лінія), 2013 р. (суцільна лінія), 2014 р. (кружки) та 2015 р. (точки).



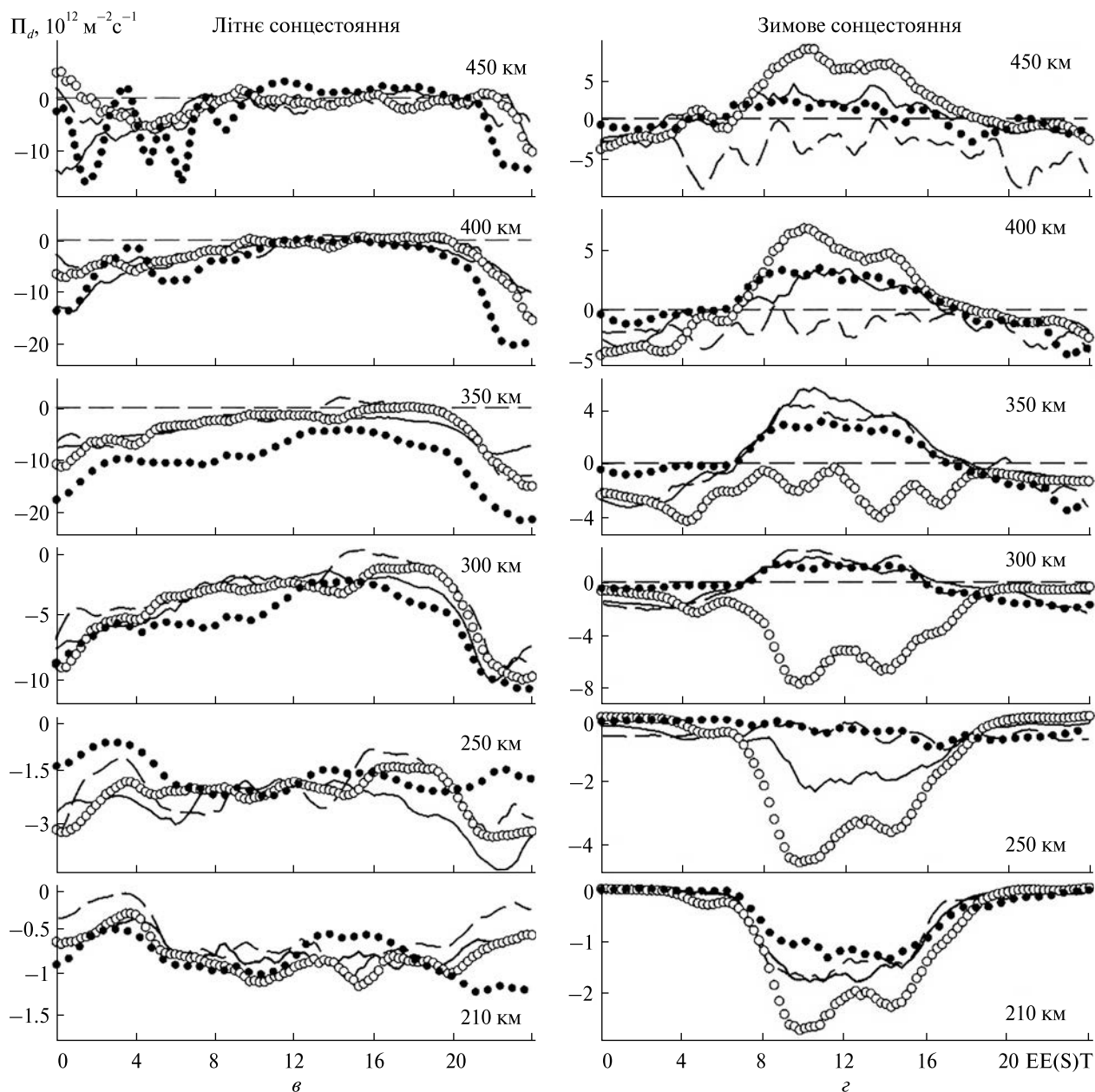
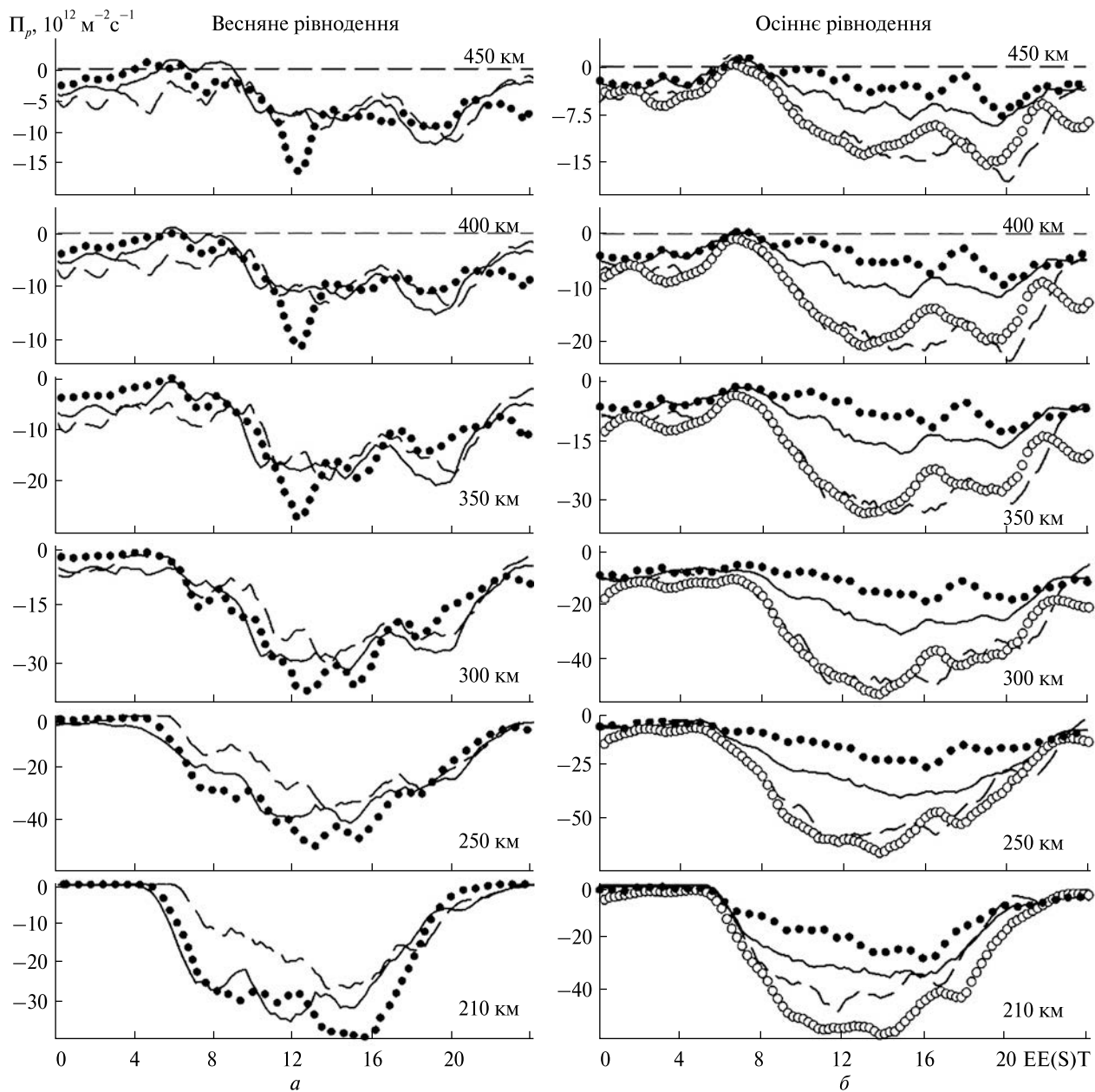


Рис. 2. Добові варіації щільності потоку плазми за рахунок амбіполярної дифузії  $\Pi_d$  для періодів: весняного (а) та осіннього (б) рівнодень; літнього (в) та зимового (г) сонцестоянь у 2012 р. (штрихова лінія), 2013 р. (суцільна лінія), 2014 р. (кружки) та 2015 р. (точки)





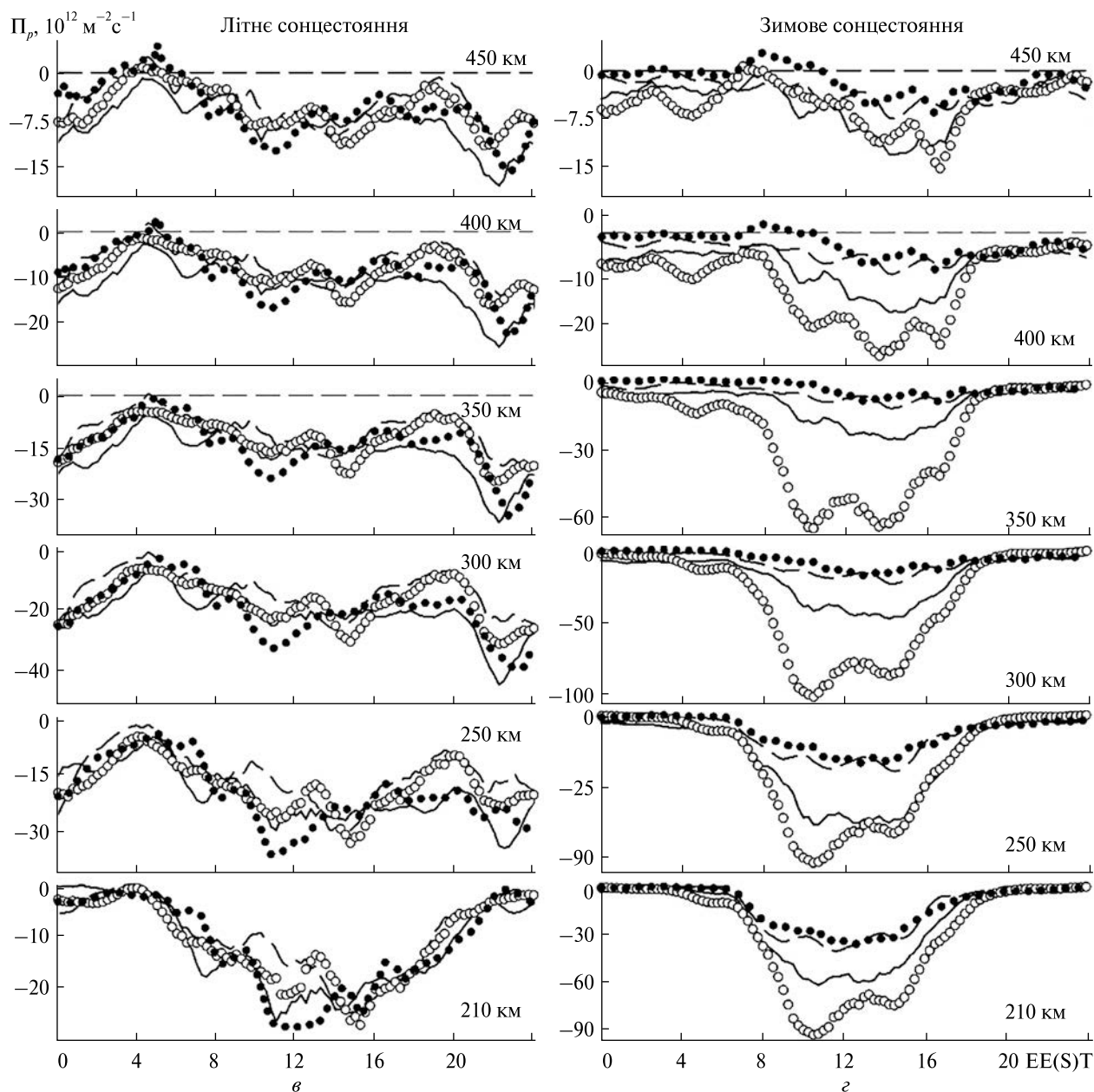


Рис. 3. Добові варіації щільності повного потоку плазми в іоносфері  $P_p$  для періодів: весняного (а) та осіннього (б) рівнодень; літнього (а) та зимового (б) сонцестоянь у 2012 р. (штрихова лінія), 2013 р. (суцільна лінія), 2014 р. (кружки) та 2015 р. (точки)

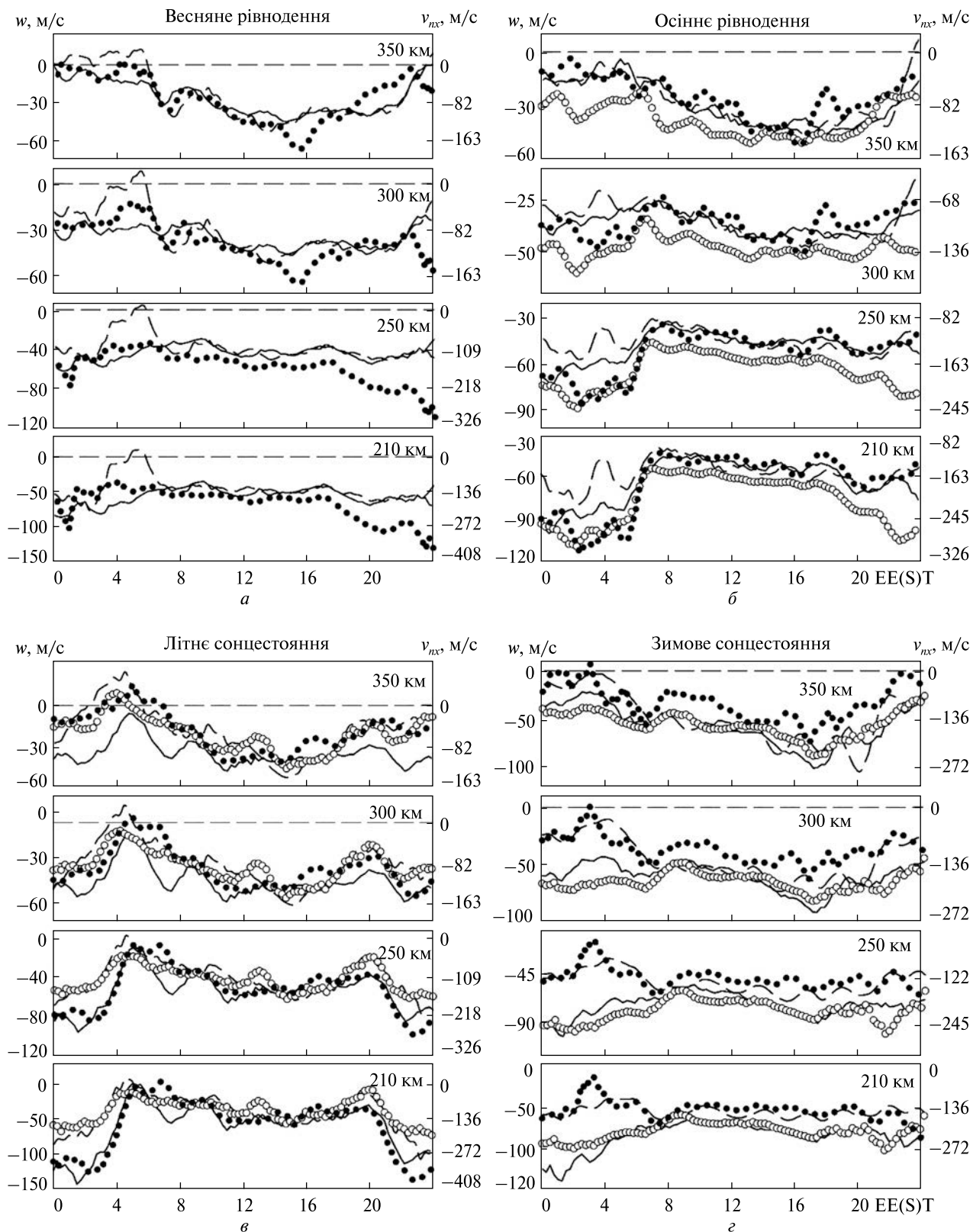


Рис. 4. Добові варіації швидкості еквівалентного нейтрального вітру  $w$  і швидкості меридіональної складової нейтрального вітру  $v_{nx}$  для періодів: весняного (а) та осіннього (б) рівнодень; літнього (в) та зимового (г) сонцестоянь у 2012 р. (штрихова лінія), 2013 р. (суцільна лінія), 2014 р. (кружки) та 2015 р. (точки)

пазоні 400...450 км значення  $\Pi_p$  були меншими. Денні значення  $\Pi_p$  у варіаціях 2014 р. у 1.5...3 рази перевищували аналогічні показники інших років, що пояснюється високою сонячною активністю (індекс  $F_{10.7}$  для 18 грудня 2014 р. становив 213 одиниць) та збуреними геліогеофізичними умовами.

**4. Швидкості еквівалентного нейтрального (термосферного) вітру і меридіональної складової нейтрального вітру.** Весняне та осіннє рівнодення. Добові варіації швидкості еквівалентного нейтрального вітру  $w$  і швидкості меридіональної складової нейтрального вітру  $v_{nx}$  у періоди рівнодень у 2012—2015 рр. представлено на рис. 4, а, б. Навесні (рис. 4, а) на висотах 210...300 км протягом всієї доби спостерігався спрямований до полюса вітер ( $v_{nx} < 0$ ). На висоті 350 км у варіаціях 2012 р. в нічні та ранкові години (00:00—06:00 EEST) спостерігалася зміна напрямку вітру до екватора ( $v_{nx} > 0$ ). Максимальні значення швидкості  $w$  спостерігалися опівночі на висоті 210 км та становили  $-150$  м/с. На висоті 350 км значення  $w$  варіювали від  $-70$  м/с до  $15$  м/с. У період осіннього рівнодення (рис. 4, б) також спостерігався нейтральний вітер, спрямований до полюса. Максимальні значення  $w$  реєструвалися вночі (близько 02:00 EEST) на висоті 210 км та становили майже  $-120$  м/с. Зі збільшенням висоти величина  $w$  зменшувалася до середніх значень  $-30$  м/с на висоті 350 км.

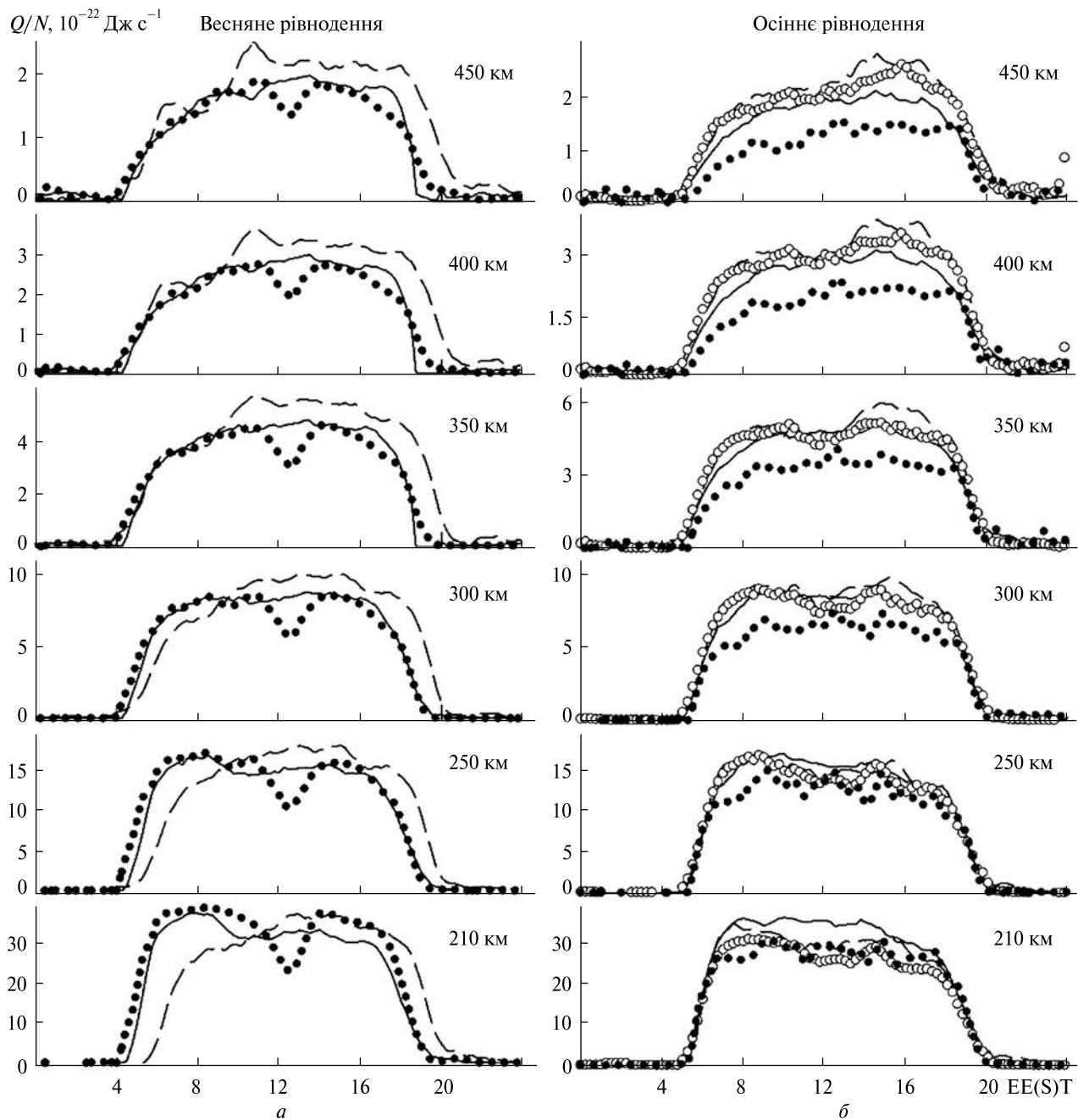
**Зимове та літнє сонцестояння.** На рис. 4, в, г наведено добові варіації швидкості еквівалентного нейтрального вітру  $w$  і швидкості меридіональної складової нейтрального вітру  $v_{nx}$  у періоди сонцестоянь у 2012—2015 рр. Влітку (рис. 4, в), як і для періодів рівнодень, спостерігався нейтральний вітер, спрямований до полюса. Максимальні значення швидкості еквівалентного нейтрального вітру на висоті 210 км становили  $-100$  м/с вночі та  $-50$  м/с вдень. Зі збільшенням висоти нічні значення  $w$  зменшилися приблизно до  $15...60$  м/с (за модулем). Взимку (рис. 4, г) протягом доби також спостерігався нейтральний вітер, спрямований до полюса. Максимальні значення  $w$ , які спостерігалися на висоті 210 км, сягали приблизно  $-135$  м/с вночі та  $-90$  м/с вдень. На висоті

350 км середні значення швидкості вітру становили  $w \approx -60$  м/с.

**5. Величина енергії, що підводиться до електрона за одиницю часу.** Основна характеристика добових варіацій  $Q/N$  (де  $N = N_e$ ) полягає в тому, що вночі підведення енергії до електронів не відбувається, а значення  $Q/N$  у цей час близькі до нуля в усьому розглянутому діапазоні висот. Починаючи з моменту сходу Сонця, відбувається збільшення величини  $Q/N$ , а після заходу Сонця — її зменшення до фонових нічних значень. Максимальні денні значення  $Q/N$  спостерігаються на висотах 210...250 км, зі збільшенням висоти величина  $Q/N$  зменшується.

**Весняне та осіннє рівнодення.** На рис. 5, а, б представлено добові варіації величини енергії, що підводиться до електрона за одиницю часу, для періодів рівнодень у 2012—2015 рр. Навесні (рис. 5, а) у 2012 та 2013 рр. добові варіації  $Q/N$  подібні між собою. У варіаціях 2015 р. близько 12:00 EEST на всіх розглянутих висотах спостерігався локальний мінімум значень  $Q/N$ . Загалом максимальні значення  $Q/N$  спостерігалися на висоті 210 км та дорівнювали приблизно  $40 \cdot 10^{-22}$  Дж·с $^{-1}$  в ранкові години та після опівдня. На висоті 450 км у денні години максимальні значення  $Q/N$  становили приблизно  $2 \cdot 10^{-22}$  Дж·с $^{-1}$ . Для періоду осіннього рівнодення (рис. 5, б) маємо подібні значення  $Q/N$ . Максимальні денні значення  $Q/N$  спостерігалися на висоті 210 км та становили приблизно  $30 \cdot 10^{-22}$  Дж·с $^{-1}$ . На висоті 450 км величина  $Q/N$  зменшилася до значень  $2 \cdot 10^{-22}$  Дж·с $^{-1}$ .

**Зимове та літнє сонцестояння.** Добові варіації величини енергії, що підводиться до електрона за одиницю часу, для періодів сонцестоянь наведено на рис. 5, в, г. Як видно з рис. 5, в, значення  $Q/N$  в діапазоні висот 210...300 км є меншими у порівнянні з величинами  $Q/N$  у період весняного рівнодення. Влітку денні значення  $Q/N$  на висоті 210 км сягали  $30 \cdot 10^{-22}$  Дж·с $^{-1}$ , а на висоті 250 км —  $Q/N \approx 13 \cdot 10^{-22}$  Дж·с $^{-1}$ . У діапазоні висот 300...400 км максимальні значення  $Q/N$  варіювали від  $3 \cdot 10^{-22}$  Дж·с $^{-1}$  до  $8 \cdot 10^{-22}$  Дж·с $^{-1}$ . Взимку (рис. 5, г) спостерігався менш тривалий період зростання  $Q/N$  у порівнянні з періодами рівнодень та літнього сонцестояння. Але максимальні



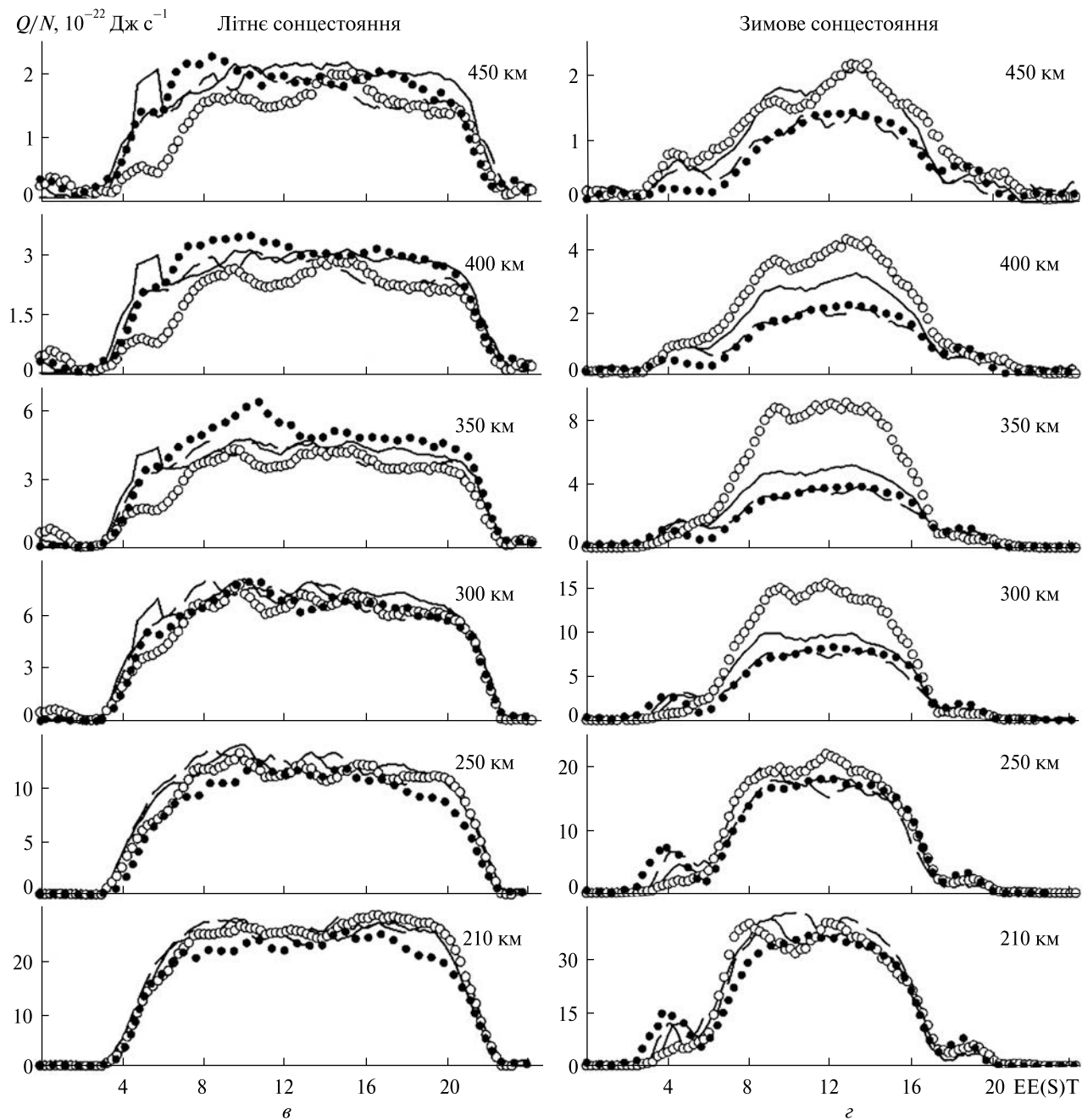
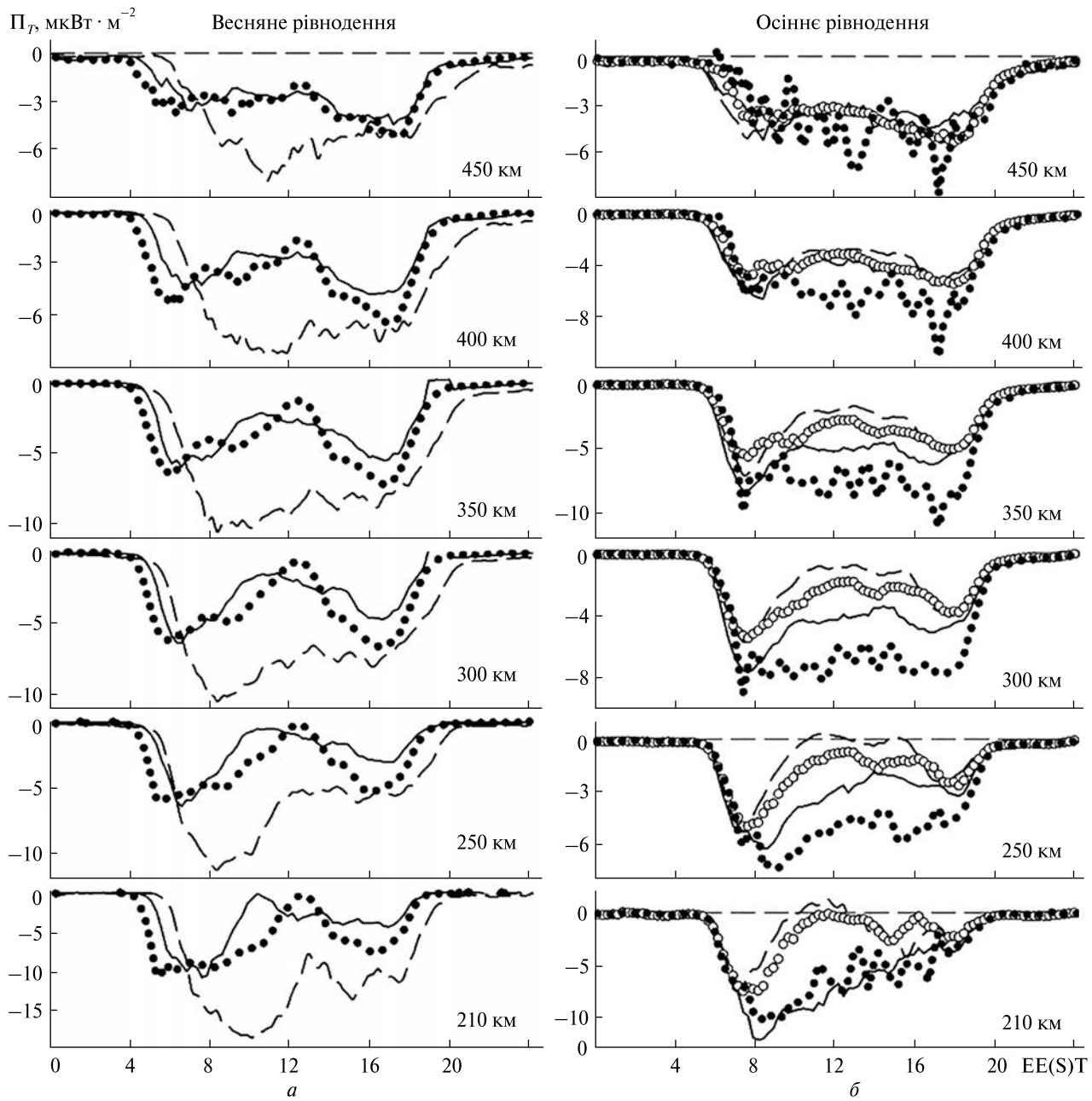


Рис. 5. Добові варіації величини енергії  $Q/N$ , яка підводиться до електрона за одиницю часу, для періодів: весняного (а) та осіннього (б) рівнодень; літнього (в) та зимового (г) сонцестоянь у 2012 р. (штрихова лінія), 2013 р. (суцільна лінія), 2014 р. (кружки) та 2015 р. (точки)



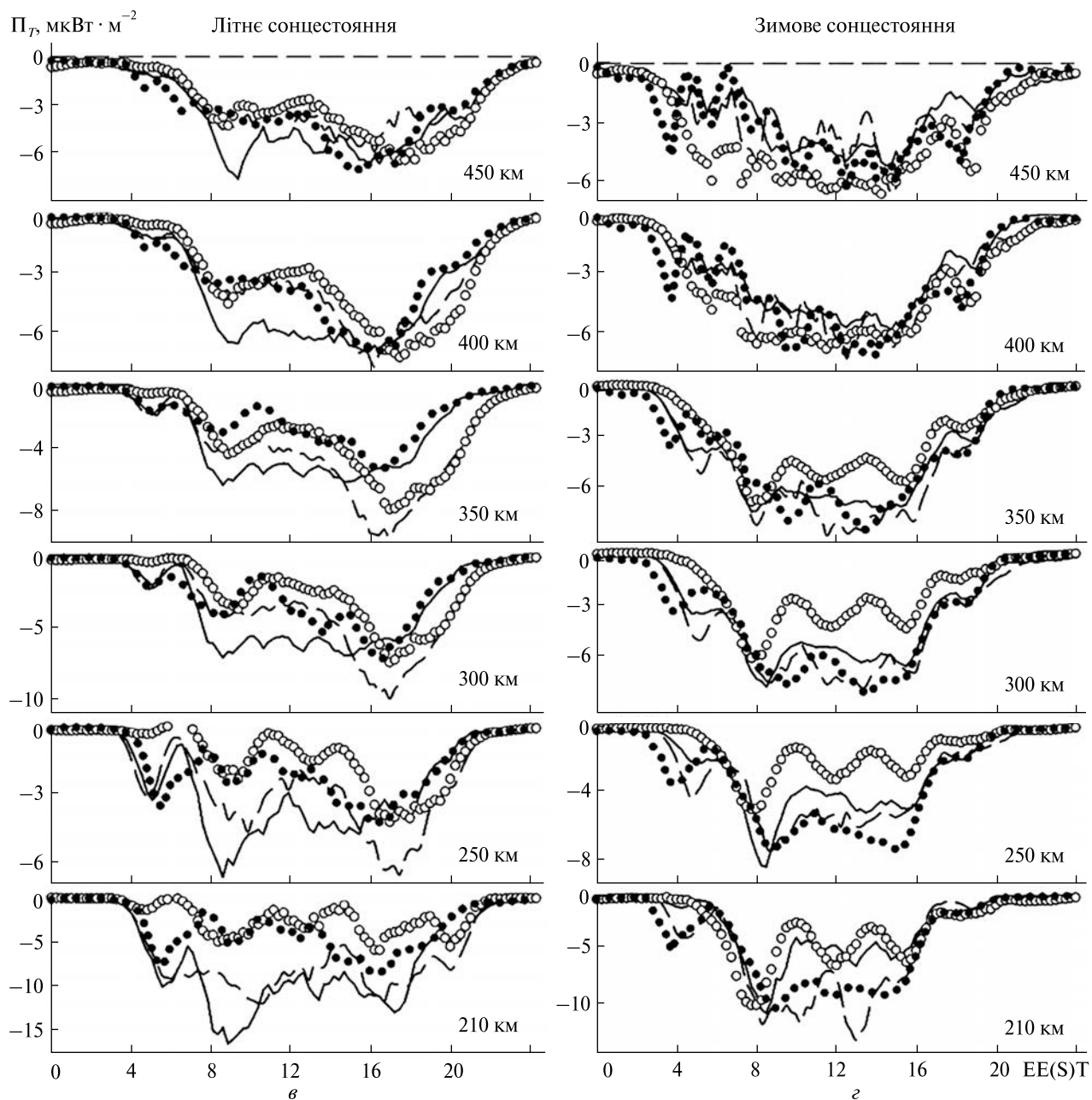


Рис. 6. Добові варіації щільності потоку тепла  $P_T$ , яке переноситься електронами в іоносферу із плазмосфери, для періодів: весняного (а) та осіннього (б) рівнодень; літнього (в) та зимового (г) сонцестоянь у 2012 р. (штрихова лінія), 2013 р. (суцільна лінія), 2014 р. (кружки) та 2015 р. (точки)



значення  $Q/N$  взимку не поступалися літнім та у періоди рівнодень. У денні години значення  $Q/N$  на висоті 210 км сягали  $45 \cdot 10^{-22}$  Дж·с<sup>-1</sup>, а на висоті 250 км —  $Q/N \approx 20 \cdot 10^{-22}$  Дж·с<sup>-1</sup>. На висотах 300...400 км внаслідок високої сонячної активності і збурених геліогеофізичних умов (див. табл. 1) денні значення  $Q/N$  у варіаціях 2014 р. перевищували у 1.5...2 рази аналогічні показники інших років.

**6. Щільність потоку тепла.** Основною ознакою добових варіацій щільності потоку тепла  $P_T$  є практична відсутність потоку в нічні години та досягнення максимальних значень (за модулем) у ранкові та вечірні години.

*Весняне та осіннє рівнодення.* На рис. 6, а, б представлено добові варіації щільності потоку тепла, яке переноситься електронами із плазмосфери в іоносферу, у періоди рівнодень у 2012—2015 рр. Навесні (рис. 6, а) добові варіації  $P_T$  у нічні години кількісно та якісно подібні між собою. Особливістю добових варіацій  $P_T$  навесні є наявність двох максимумів — ранкового (близько 08:00 EEST) та вечірнього (близько 16:00 EEST). Локалізація цих максимумів може змінюватися в залежності від висоти та сезону, а їхня амплітуда залежить від стану космічної погоди. У варіаціях  $P_T$  навесні 2012 р. є помітними ефекти магнітних бур, основний ефект яких полягає у посиленні низхідного потоку тепла в іоносферу Землі. Така поведінка  $P_T$  цілком пов'язана з варіаціями параметрів космічної погоди та станом геомагнітної активності. На поведінку  $P_T$  восени 2015 р. (рис. 6, б) також вплинув стан космічної погоди. З рис. 6, а, б видно, що навіть невелике збурення може спричинити значні кількісні та якісні зміни у добових варіаціях  $P_T$ .

*Зимове та літнє сонцестояння.* На рис. 6 в, г представлено добові варіації щільності потоку тепла  $P_T$  у періоди сонцестоянь у 2012—2015 рр. Форми добових залежностей влітку (рис. 6, в) подібні між собою на всіх розглянутих висотах. Максимальні значення щільності потоку тепла спостерігалися на висоті 210 км та варіювали від  $-10 \cdot 10^{-6}$  до  $-15 \cdot 10^{-6}$  Вт·м<sup>-2</sup>. Добові варіації  $P_T$  взимку (рис. 6, г) мали складний характер. У варіаціях 2015 р. на висотах 400...450 км в ранкові

та денні години спостерігався квазіперіодичний процес. Особливістю варіацій 2014 р. була наявність локальних максимумів на висотах 210...350 км. Максимальні значення щільності потоку тепла  $P_T$  в діапазоні висот 210...450 км варіювали від  $-6 \cdot 10^{-6}$  Вт·м<sup>-2</sup> до  $-12 \cdot 10^{-6}$  Вт·м<sup>-2</sup>.

## ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Виконані дослідження надають унікальну можливість оцінити динаміку і зміни параметрів іоносферної плазми, які відбуваються в залежності від рівня сонячної активності та інших геліогеофізичних чинників.

Розглянемо поведінку параметрів іоносферної плазми у спокійних геомагнітних умовах на фазах мінімуму (2009 та 2019 рр.) [3] та максимуму (2012—2015 рр.) 24-го циклу сонячної активності. Аналіз просторово-часових варіацій параметрів динамічних та теплових процесів у іоносферній плазмі на цих двох фазах сонячної активності є важливим для розуміння впливу сонячної активності на іоносферу та атмосферу Землі. Результати, отримані в рамках цього дослідження, відкривають нові можливості для прогнозування впливу сонячної активності на іоносферу.

Добові варіації вертикальної складової швидкості переносу плазми  $v_d$  за рахунок амбіполярної дифузії мають спільні риси для періодів рівнодень та сонцестоянь на обох фазах сонячної активності. На фазі мінімуму сонячної активності у періоди рівнодень в нічні години спостерігається перенесення плазми вниз ( $v_d < 0$ ), і ця тенденція спостерігається для більшості висот. На фазі максимуму в нічний час також спостерігається перенесення плазми вниз, проте значення  $v_d$  на висотах 350...450 км є суттєво меншими. Влітку у максимумі сонячної активності у варіаціях  $v_d$  на висоті 450 км в нічний та ранковий час спостерігаються квазіперіодичні хвильові процеси.

При обох фазах сонячної активності зі збільшенням висоти спостерігається збільшення щільності потоку плазми  $P_d$  за рахунок амбіполярної дифузії. Добові варіації  $P_d$  мають схожий характер: в денні години дифузійний потік плазми практично відсутній, тоді як у нічний час спостерігається низхідний потік плазми. Макси-

мальні значення  $P_d$  подібні між собою для періодів рівнодень, проте у періоди сонцестоянь значення  $P_d$  на висотах 250...400 км переважають у 1.5...3 рази на фазі максимуму сонячної активності внаслідок більшої іонізації іоносфери.

Добові варіації щільності повного потоку плазми  $P_p$  подібні між собою для періодів рівнодень та сонцестоянь на обох фазах сонячної активності. Максимальні значення  $P_p$  на фазі максимуму сонячної активності були у 2...4 рази більшими (за модулем) порівняно з фазою мінімуму. Зокрема, денні значення щільності повного потоку плазми у період зимового сонцестояння у варіаціях 2014 р. перевищували у 1.5...3 рази аналогічні показники інших років, що може пояснюватися сезонною аномалією, характерною для високої сонячної активності (індекс  $F_{10.7}$  для 18 грудня 2014 р. становив 213 одиниць).

Добові варіації швидкості еквівалентного нейтрального (термосферного) вітру  $w$  якісно подібні між собою як на фазі мінімуму, так і на фазі максимуму сонячної активності. Протягом доби переважає нейтральний вітер, спрямований до полюса. Для обох фаз сонячної активності у періоди рівнодень максимальні значення  $w$  реєструвалися вночі (близько 02:00 EEST) на висоті 210 км та становили майже  $-120$  м/с.

Добові варіації енергії  $Q/N$ , що підводиться до електрона за одиницю часу, є типовими для всіх розглянутих періодів на обох фазах сонячної активності. Максимальні значення  $Q/N$  на фазі максимуму були в 1.3...3 рази більшими порівняно з фазою мінімуму в усьому висотному інтервалі. Загалом параметр  $Q/N$  виявляє подібну залежність в обох фазах сонячної активності.

Характерною ознакою добових варіацій щільності потоку тепла  $P_T$  є практична відсутність потоку в нічний час і досягнення максимальних значень (за модулем) в ранкові та вечірні години, що пояснюється змінами висотного градієнту температури електронів. У добових варіаціях  $P_T$  навесні спостерігалися два максимуми: ранковий (близько 08:00 EEST) та вечірній (близько 16:00 EEST). Локалізація цих максимумів може змінюватися в залежності від висоти та сезону, а амплітуда залежить від стану космічної погоди. Ці тенденції спостерігалися для обох фаз со-

нячної активності. Максимальні значення  $P_T$  на фазі максимуму були у 1.5...2.5 рази більшими порівняно з фазою мінімуму.

## ВИСНОВКИ

Для характерних геофізичних періодів (весняне та осіннє рівнодення, літнє та зимове сонцестояння) побудовано та проаналізовано добові варіації параметрів динамічних та теплових процесів у іоносферній плазмі на висотах від 210 до 450 км. Розраховано значення швидкості перенесення плазми за рахунок амбіполярної дифузії, щільності повного потоку плазми та потоку заряджених частинок за рахунок амбіполярної дифузії, швидкості еквівалентного нейтрального вітру та меридіональної складової швидкості нейтрального вітру, значення енергії, що підводиться до електронного газу, а також щільності потоку тепла, яке переноситься електронами з плазмосфери до іоносфери.

Встановлено, що для більшості досліджуваних періодів варіації космічної погоди призводили до значних змін у просторово-часових варіаціях параметрів динамічних та теплових процесів у іоносфері. Ефекти варіацій космічної погоди та посилення геомагнітної активності суттєво проявилися у варіаціях щільності потоку плазми за рахунок амбіполярної дифузії, щільності повного потоку плазми, а також енергії, що підводиться до електрона за одиницю часу. Кількісні та якісні характеристики цих параметрів та їхні добові варіації у період максимуму сонячної активності (2012—2015 рр.) були характерними для розглянутих сезонів, але істотно змінювалися (у 2...3 рази) під час збурень космічної погоди навіть у періоди незначного посилення геомагнітної активності. Причинами таких змін могли бути фізичні процеси в іоносфері, а саме посилення горизонтальних термосферних вітрів, проникнення зональних магнітосферних електричних полів у середні широти та інші процеси, що призвели до помітної перебудови динамічного і теплового режимів геокосмічної плазми.

Загалом можна зробити висновок, що екстремальні значення параметрів динамічних та теплових процесів у іоносфері суттєво за-

лежать від фази циклу сонячної активності, геомагнітної обстановки, сезону та стану космічної погоди.

Результати моделювання, отримані в цій роботі, можна використовувати у фундаменталь-

них дослідженнях сонячно-земних зв'язків та геокосмосу, при вирішенні прикладних задач прогнозування стану космічної погоди, а також для подальшого розвитку регіональної моделі іоносфери CERIM ION.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Дзюбанов Д. А., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности. *Космічна наука і технологія*. 2008. **14**, № 1. С. 44—56. <https://doi.org/10.15407/knit2008.01.044>
2. Искра Д. А., Колодяжний В. В., Ляшенко М. В. *Разработка региональной модели ионосферы CERIM ION в рамках создания службы прогноза космической погоды*. Теоретические и прикладные аспекты радиотехники, приборостроения и компьютерных технологий: Матер. IV Междунар. научно-техн. конф. (20—21 июня 2019 г.). Сб. тез. Тернополь: ФОП Паляница В. А., 2019. С. 15—18.
3. Колодяжний В. В., Ляшенко М. В., Ємельянов Л. Я., Дзюбанов Д. А. Моделювання просторово-часових варіацій параметрів динамічних та теплових процесів у геокосмосі над Україною у період мінімуму 24-го циклу сонячної активності (2009 та 2019 рр.). *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 1 (140). С. 15—35. <https://doi.org/10.15407/knit2023.01.015>
4. Ляшенко М. В., Пуляев В. А., Черногор Л. Ф. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период роста солнечной активности. *Космічна наука і технологія*. 2006. **12**, № 5/6. С. 58—68. <https://doi.org/10.15407/knit2006.05.058>
5. Ляшенко М. В., Склярів І. Б., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период спада солнечной активности. *Космічна наука і технологія*. 2006. **12**, № 2/3. С. 45—58. <https://doi.org/10.15407/knit2006.02.045>
6. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период максимума солнечной активности. *Космічна наука і технологія*. 2006. **12**, № 4. С. 56—70. <https://doi.org/10.15407/knit2006.04.056>
7. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. *Физика геокосмических бурь*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. 407 с.
8. Buonsanto M. J., Holt J. M. Measurements of gradients in ionospheric parameters with a new nine-position experiment at Millstone Hill. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1995. **57**. P. 705—717.
9. Cai, Y., Yue, X., Wang, W., Zhang, S., Liu, H., Lei, J., et al. Ionospheric topside diffusive flux and the formation of summer nighttime ionospheric electron density enhancement over Millstone Hill. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**(4). e2021GL097651. <https://doi.org/10.1029/2021gl097651>
10. Chernogor L. F., Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V. Physical processes in the ionosphere during the solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv, Ukraine (49.6° N, 36.3° E). *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. **182**. P. 1—9. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.016>
11. Chernogor L., Domnin I., Lyashenko M. Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) for Space Weather Forecasting. EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria, 2—7 May 2010). *Geophys. Res. Abstract.* 2010. **12**. EGU2010-316-2.
12. Domnin I. F., Cherpurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya., Chernyaev S. V., Kononenko A. F., Kotov D. V., Bogomaz O. V., Iskra D. A. Kharkiv incoherent scatter facility. *Bull. NTU “KhPI”. Ser. Radiophysics and ionosphere*. 2014. № 47 (1089). P. 28—42. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpiri\\_2014\\_47\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpiri_2014_47_7)
13. Emel'yanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F., Domnin I. F. Motion of ionospheric plasma: results of observation above Kharkiv in solar cycle 24. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018. **58**, № 4. P. 533—547. <https://doi.org/10.1134/S001679321802007X>
14. Emelyanov L. Ya., Katsko S. V., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Ionosphere response to geospace storm on 25 September 2016 over Kharkiv (Ukraine). *Adv. Space Res.* 2023. **71** (8). P. 3323—3345. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.02.004>
15. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar. *Proc. IEEE*. 1969. **57**, № 4. P. 496—530. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7005>
16. Gordon W. E. Incoherent scatter of radio waves by free electrons with applications to space exploration by Radar. *Proc. IRE*. 1958. **46**. P. 1824—1829.

17. Lei J., Roble R. G., Wang W., Emery B. A., Zhang S.-R. Electron temperature climatology at Millstone Hill and Arecibo. *J. Geophys. Res.* 2007. **112**, A02302. <https://doi.org/10.1029/2006JA012041>
18. Li Q., Hao Y., Zhang D., Xiao Z. Nighttime enhancements in the midlatitude ionosphere and their relation to the plasmasphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. **123**(9). P. 7686—7696. <https://doi.org/10.1029/2018ja025422>
19. Mathews J. D. A short history of geophysical radar at Arecibo Observatory. *Hist. Geo Space. Sci.* 2013. **4**. P. 19—33. <https://doi.org/10.5194/hgss-4-19-2013>
20. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., Aikin A. C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002. **107** (A12). P. 1—16. <https://doi.org/10.1029/2002JA009430>
21. Richards P. G. Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models. *J. Geophys. Res.* 2001. **106** (A7). P. 12803—12819. <https://doi.org/10.1029/2000JA000365>
22. Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K. J. F., Ulich T. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion. *Ann. Geophysicae.* 2000. **18**. P. 945—956. <https://doi.org/10.1007/s00585-000-0945-6>
23. Salah J. E., Evans J., Wand R. N. Seasonal variations in the thermosphere above Millstone Hill. *Radio Sci.* 1974. **9** (2). P. 231—238. <https://doi.org/10.1029/RS009i002p00231>
24. Schunk R. W., Nagy A. F. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge: Atmospheric and Space Sci. Ser., 2000. 555 p.
25. Sethi N. K., Dabas R. S., Vohra V. K. Diurnal and seasonal variations of hmF2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001. *Ann. Geophysicae.* 2004. **22**. P. 453—458. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-453-2004>
26. Woodman R. F., Farley D. T., Balsley B. B., Milla M. A. The early history of the Jicamarca Radio Observatory and the incoherent scatter technique. *Hist. Geo Space. Sci.* 2019. **10**. P. 245—266. <https://doi.org/10.5194/hgss-10-245-2019>
27. Wu Q., Sheng C., Wang W., Noto J., Kerr R., McCarthy M., et al. The midlatitude thermospheric dynamics from an inter-hemispheric perspective. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. **124**(10). P. 7971—7983. <https://doi.org/10.1029/2019ja026967>
28. Yemelyanov L. Ya. Radio physical observations of plasma drift velocities in the ionosphere near the maximum of solar cycle 24. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2015. **74** (20). P. 1841—1855. <https://dx.doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v74.i20.60>
29. Yue X. A., Wan W. X., Xiao H., Zeng L. Q., Ke C. H., Ning B. Q., et al. Preliminary experimental results by the prototype of Sanya Incoherent Scatter Radar. *Earth Planet. Phys.* 2020. **4**(6). P. 579—587. <https://doi.org/10.26464/epp2020063>
30. Zang S., Holt J. M., Zaluca A. M. Midlatitude ionospheric plasma temperature climatology and empirical model based on Saint Santin incoherent scatter radar data from 1966 to 1987. *J. Geophys. Res.* 2004. **109** (A11). P. 1—9.

## REFERENCES

1. Dzyubanov D. A., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2008). Investigation and modeling of ionospheric plasma parameter variations during minimum period of the 23-th solar activity cycle. *Space Science and Technology*, **14**, № 1, 44—56. <https://doi.org/10.15407/knit2008.01.044>
2. Iskra D. A., Kolodyazhnyi V. V., Lyashenko M. V. (2019). *Development of the CERIM IION regional ionosphere model as part of the creation of the space weather forecast service*. Theoretical and applied aspects of radio engineering, instrument making and computer technologies. Proc. the IV Int. Sci. and Technical Conf. (June 20—21, 2019): a collection of abstracts. Ternopil: Individual Entrepreneur Palyanytsya V A, 15—18.
3. Kolodyazhnyi V. V., Lyashenko M. V., Emelyanov L. Ya., Dziubanov D. A. (2023). Modeling of spatial-temporal variations of dynamic and thermal process parameters in geospace over Ukraine during the minimum of 24-th cycle of solar activity (2009, 2019). *Space Science and Technology*, **29**, № 1 (140), 15—35. <https://doi.org/10.15407/knit2023.01.015>
4. Lyashenko M. V., Pulyaev V. A., Chernogor L. F. (2006). Diurnal and seasonal variations of ionospheric plasma parameters during rise solar activity period. *Space Science and Technology*, **12**, № 5/6, 58—68. <https://doi.org/10.15407/knit2006.05.058>
5. Lyashenko M. V., Sklyarov I. B., Chernogor L. F., Chernyak Yu. V. (2006). Diurnal and seasonal variations of ionospheric plasma parameters on solar activity abatement. *Space Science and Technology*, **12**, № 2/3, 45—58. <https://doi.org/10.15407/knit2006.02.045>
6. Lyashenko M. V., Chernogor L. F., Chernyak Yu. V. (2006). Diurnal and seasonal variations of ionospheric plasma parameters at maximum solar activity period. *Space Science and Technology*, **12**, № 4, 56—70. <https://doi.org/10.15407/knit2006.04.056>
7. Chernogor L. F., Domnin I. F. (2014). *Physics of Geospace Storms*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv Nat. Univ. Publ., 407 p. [in Russian].
8. Buonsanto M. J., Holt J. M. (1995). Measurements of gradients in ionospheric parameters with a new nine-position experiment at Millstone Hill. *J. Atmospheric and Terr. Phys.*, **57**, 705—717.
9. Cai, Y., Yue, X., Wang, W., Zhang, S., Liu, H., Lei, J., et al. (2022). Ionospheric topside diffusive flux and the formation of summer nighttime ionospheric electron density enhancement over Millstone Hill. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(4). e2021GL097651. <https://doi.org/10.1029/2021gl097651>

10. Chernogor L. F., Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V. (2019). Physical processes in the ionosphere during the solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv, Ukraine (49.6° N, 36.3° E). *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **182**, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.016>
11. Chernogor L., Domnin I., Lyashenko M. (2010). Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM IION) for Space Weather Forecasting. *EGU General Assembly 2010* (Vienna, Austria, 2–7 May 2010). *Geophys. Res. Abstract*, **12**, EGU2010-316-2.
12. Domnin I. F., Chepurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya., Chernyayev S. V., Kononenko A. F., Kotov D. V., Bogomaz O. V., Iskra D. A. (2014). Kharkiv incoherent scatter facility. *Bull. NTU “KhPI”. Ser. Radiophysics and ionosphere*, № 47, (1089), 28–42. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpiri\\_2014\\_47\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpiri_2014_47_7)
13. Emel’yanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F., Domnin I. F. (2018). Motion of ionospheric plasma: results of observation above Kharkiv in solar cycle 24. *Geomagnetism and Aeronomy*, **58**, № 4, 533–547. <https://doi.org/10.1134/S001679321802007X>
14. Emelyanov L. Ya., Katsko S. V., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2023). Ionosphere response to geospace storm on 25 September 2016 over Kharkiv (Ukraine). *Adv. Space Res.*, **71**, № 8, 3323–3345. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.02.004>
15. Evans J. V. (1969). Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar. *Proc. IEEE*, **57**, № 4, 496–530. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7005>
16. Gordon W. E. (1958). Incoherent scatter of radio waves by free electrons with applications to space exploration by Radar. *Proc. IRE*, **46**, 1824–1829.
17. Lei J., Roble R. G., Wang W., Emery B. A., Zhang S.-R. (2007). Electron temperature climatology at Millstone Hill and Arecibo. *J. Geophys. Res.*, **112**, A02302. <https://doi.org/10.1029/2006JA012041>
18. Li Q., Hao Y., Zhang D., Xiao Z. (2018). Nighttime enhancements in the midlatitude ionosphere and their relation to the plasmasphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **123**(9), 7686–7696. <https://doi.org/10.1029/2018ja025422>
19. Mathews J. D. (2013). A short history of geophysical radar at Arecibo Observatory. *Hist. Geo Space. Sci.*, **4**, 19–33. <https://doi.org/10.5194/hgss-4-19-2013>
20. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., Aikin A. C. (2002). NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.*, **107**, № A12, 1–16. <https://doi.org/10.1029/2002JA009430>
21. Richards P. G. (2001). Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models. *J. Geophys. Res.*, **106**, № A7, 12803–12819. <https://doi.org/10.1029/2000JA000365>
22. Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K. J. F., Ulich T. (2000). Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion. *Ann. Geophysicae*, **18**, 945–956. <https://doi.org/10.1007/s00585-000-0945-6>
23. Salah J. E., Evans J., Wand R. N. (1974). Seasonal variations in the thermosphere above Millstone Hill. *Radio Sci.*, **9**, № 2, 231–238. <https://doi.org/10.1029/RS009i002p00231>
24. Schunk R. W., Nagy A. F. (2000). *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge, Atmospheric and Space Sci. Ser., 555 p.
25. Sethi N. K., Dabas R. S., Vohra V. K. (2004). Diurnal and seasonal variations of hmF2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001. *Ann. Geophysicae*, **22**, 453–458. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-453-2004>
26. Woodman R. F., Farley D. T., Balsley B. B., Milla M. A. (2019). The early history of the Jicamarca Radio Observatory and the incoherent scatter technique. *Hist. Geo Space. Sci.*, **10**, 245–266. <https://doi.org/10.5194/hgss-10-245-2019>
27. Wu Q., Sheng C., Wang W., Noto J., Kerr R., McCarthy M., et al. (2019). The midlatitude thermospheric dynamics from an interhemispheric perspective. *J. Geophys. Res: Space Phys.*, **124**(10), 7971–7983. <https://doi.org/10.1029/2019ja026967>
28. Yemelyanov L. Ya. (2015). Radio physical observations of plasma drift velocities in the ionosphere near the maximum of solar cycle 24. *Telecommunications and Radio Engineering*, **74**, № 20, 1841–1855. <https://dx.doi.org/10.1615/Telecom-RadEng.v74.i20.60>
29. Yue X. A., Wan W. X., Xiao H., Zeng L. Q., Ke C. H., Ning B. Q., et al. (2020). Preliminary experimental results by the prototype of Sanya Incoherent Scatter Radar. *Earth Planet. Phys.*, **4**, № 6, 579–587. <https://doi.org/10.26464/epp2020063>
30. Zang S., Holt J. M., Zalucha A. M. (2004). Midlatitude ionospheric plasma temperature climatology and empirical model based on Saint Santin incoherent scatter radar data from 1966 to 1987. *J. Geophys. Res.*, **109**, № A11, 1–9.

Стаття надійшла до редакції 30.07.2023

Після доопрацювання 30.10.2023

Прийнято до друку 07.11.2023

Received 30.07.2023

Revised 30.10.2023

Accepted 07.11.2023

V. V. Kolodyazhnyi<sup>1,2</sup>, Junior Researcher, Ph.D. student of the Department of Radio Electronics

E-mail: Vyacheslav.Kolodyazhnyi@infiz.khpi.edu.ua

M. V. Lyashenko<sup>1</sup>, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D. in Phys&Math), Senior Researcher

E-mail: intercosmos80@gmail.com

L. Ya. Emelyanov<sup>1</sup>, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D. in Phys&Math), Senior Researcher, Leading Researcher

E-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com

D. A. Dziubanov<sup>2</sup>, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D. in Phys&Math), Senior Researcher, Professor

E-mail: Dmytro.Dziubanov@khpi.edu.ua

<sup>1</sup> Institute of Ionosphere of the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine  
16 Кирпичова Str, Kharkiv, 61002 Ukraine

<sup>2</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

2 Кирпичова Str., Kharkiv, 61002 Ukraine

#### MODELING OF SPATIAL-TEMPORAL VARIATIONS OF PHYSICAL PROCESS PARAMETERS IN THE IONOSPHERIC PLASMA OVER UKRAINE DURING THE MAXIMUM PHASE OF THE 24-TH SOLAR ACTIVITY CYCLE (2012—2015)

The object of research is physical processes occurring in the ionospheric plasma. The subject of research: spatial-temporal variations of the main parameters of the ionospheric plasma, which were obtained using incoherent scatter radar. Research methods include the ground-based radiophysical method of incoherent scatter of radio waves, statistical analysis of observation results, and semi-empirical modeling of parameters of dynamic and thermal processes.

Modeling and analysis of spatial-temporal variations of the dynamic and thermal processes parameters in the ionosphere during the maximum phase of the 24th solar activity cycle (2012—2015) have been performed using experimental data obtained by the Kharkiv incoherent scatter radar. For the periods of the equinoxes and solstices, diurnal dependences of process parameters in the ionospheric plasma at altitudes from 210 to 450 km were constructed. The values of plasma transfer velocity due to ambipolar diffusion, the density of the full plasma flux, and the flux of charged particles due to ambipolar diffusion were determined. The values of the energy supplied to the electron gas, the density of the heat flux transferred by electrons from the plasmasphere to the ionosphere, as well as the velocity of the equivalent neutral wind and the meridional component of the neutral wind velocity, were calculated.

It was established that for the considered periods, the effects of space weather variations and geomagnetic activity were significantly manifested in variations of the plasma flux density due to ambipolar diffusion, the density of the full plasma flux, as well as the energy supplied to electrons per unit time. Quantitative and qualitative characteristics of these parameters were typical but changed significantly (by 2...3 times) in some cases, even with a slight increase in geomagnetic activity.

**Keywords:** ionosphere, ionospheric modeling, dynamic and thermal processes in the ionosphere, radiophysical methods of geospace research, solar activity.