

УДК 520.27+523.9+52-854

## Спорадичне радіовипромінювання навколоземного простору напередодні максимуму 23-го циклу сонячної активності

О. В. Дудник

Харківський національний університет ім. В. М. Каразіна  
61077, м. Харків, пл. Свободи, 4

*Обговорюються результати спостережень високочастотного спорадичного радіовипромінювання магнітосфери Землі на середніх широтах напередодні максимуму 23-го циклу сонячної активності. Проводиться зіставлення рівня радіофону та густини радіосплесків на частоті 150 МГц з сонячною та магнітосферною активністю за період з 20 липня по 16 серпня 1999 р. Показано, що найбільш ефективними для генерації спорадичних радіосплесків є ті сонячні спалахи, які супроводжуються викидами великих мас низькоенергійних частинок та плазмових неоднорідностей. Зіставлення сплесків радіофону з динамікою енергійних електронів на висотах геостационарних супутників показало високу кореляцію при взаємному часовому зсуві максимумів процесів в декілька годин. Робиться припущення про генерацію сплесків, що спостерігаються, як правило, протягом 2—3 год у внутрішніх шарах магнітосфери після радіальної дифузії енергійних електронів зовнішньої магнітосфери.*

*СПОРАДИЧЕСКОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА НАКАНУНЕ МАКСИМУМА 23-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ, Дудник А. В. — Обсуждаются результаты наблюдений высокочастотного спорадического радиоизлучения магнитосферы Земли накануне максимума 23 цикла солнечной активности. Проводится сопоставление уровня радиофона и плотности всплесков на частоте 150 МГц с солнечной и магнитосферной активностью за период с 20 июля по 16 августа 1999 г. Показано, что наиболее эффективными для генерации спорадических радиовсплесков являются те солнечные вспышки, которые сопровождаются выбросами больших масс низкоэнергетических частиц и плазменных неоднородностей. Сопоставление всплесков радиофона с динамикой энергичных электронов на высотах геостационарных спутников показало высокую корреляцию при взаимном временном сдвиге максимумов процессов в несколько часов. Делается предположение о генерации всплесков, которые наблюдаются, как правило, на протяжении 2—3 ч во внутренних слоях магнитосферы после радиальной диффузии энергичных электронов внешней магнитосферы.*

*SPORADIC RADIO EMISSION IN THE NEAR EARTH SPACE ON THE EVE OF THE 23rd CYCLE OF SOLAR ACTIVITY, Dudnik O. V. — Results of the measurements of the high frequency sporadic radio emission from the Earth's magnetosphere before the maximum of the 23rd solar activity cycle are discussed. The radio noise level and burst density at a frequency of 150 MHz*

*are compared with the solar and magnetospheric activity from 20 July to 16 August 1999. It is shown that those solar flares which are accompanied by big ejections of low-energy particles and plasma instabilities are most efficient in the generation of sporadic radio bursts. The radio noise bursts showed good correlation with the dynamics of energetic electrons at heights of geostationary satellites, with a time delay of some hours between the maxima of both processes. The bursts which are observed, as a rule, during 2-3 hours are suggested to be generated in the inner layers of the magnetosphere after the radial diffusion of energetic electrons from the outer magnetosphere.*

## ВСТУП

Радіовипромінювання навколоземного космічного простору на середніх широтах на частотах від кількох десятків МГц до сотень МГц було відкрите на початку 1970-х рр. [1, 7]. Проведені численні дослідження радіосплесків та виявлено залежність їхньої появи від сонячної і магнітосферної активності, сплесків сонячного УФ- і рентгенівського випромінювань, міжпланетних ударних хвиль [3, 4]. Зважаючи на високу частоту радіовипромінювання, були зроблені розрахунки інтенсивності синхротронного випромінювання енергійних електронів внутрішнього радіаційного поясу у магнітному полі Землі [9]. Результати були обнадійливими на висотах, що не перевищували 100—200 км, де напруженість магнітного поля висока порівняно з більш віддаленими від поверхні Землі зонами. Але експериментально проведено тільки одне зіставлення динаміки енергійних електронів на  $L = 2$  з поведінкою інтенсивності радіовипромінювання на частотах 38 та 325 МГц [2]. Тому актуальним залишається питання механізму випромінювання та одночасного спостереження радіальної і пітч-кутової дифузії енергійних частинок радіаційних поясів та генерації спорадичних радіосплесків.

## РАДІОПРИЙМАЛЬНІ ТРАКТИ ТА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Установка для реєстрації надвисокочастотного радіовипромінювання магнітосфери Землі, що розташована поблизу Харкова (параметр Мак-Ілвайна  $L \approx 2$ ) дозволяє проводити безперервний цілодобовий моніторинг рівня радіочастотного фону магнітосфери Землі на двох фіксованих частотах з різних напрямків небозводу. Вона складається з двох радіотелескопів та радіоприймальних пристроїв на частоти  $f = 150$  і  $500$  МГц.

Антенна система для прийому сигналів на частоті 150 МГц — це синфазна антенна решітка з чотирьох 7-елементних антен типу Ягі. Сигнали на частоті 500 МГц приймаються подібною синфазною решіткою, але з 13-елементних антен того ж типу. Оскільки кожна з антенних систем виконана так, що є можливість механічного обертання у вертикальній та горизонтальній площинах, за допомогою установки можна вивчати напрямки приходу радіосплесків.

Повна ширина діаграми спрямованості решітки на частоті 150 МГц в електричній площині складає  $34^\circ$ . Коефіцієнт підсилення та ефективна площа антени складають відповідно 15 дБ та  $10 \text{ м}^2$ . Поріг чутливості радіотелескопа складає приблизно  $10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$  на частоті 150 МГц і  $10^{-21} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$  на частоті 500 МГц; смуга пропускання радіоприймальних трактів — біля 2 МГц.

Для автоматизації спостережень комп'ютер типу IBM 486 доповнено універсальним програмованим блоком для забезпечення взаємодії з зовнішніми пристроями. Блок містить 12-розрядні АЦП та ЦАП, 8-канальний

комутатор вхідних аналогових сигналів, модуль цифрового вводу-виводу, який має 4 порти, 3-канальний програмований модуль таймера та модуль переривань.

Спеціально розроблений комплекс програм дозволяє накопичувати та зберігати інформацію в цифровому вигляді на стандартних носіях. Базовою програмою передбачено втручання оператора для забезпечення коригування системної дати і часу спостережень, завдання частоти опитування системи спостережень. Частота опитування, яка задана оператором, є параметром підпрограми ініціювання внутрішнього таймера контролера. Керуюча програма здійснює апаратний запуск АЦП за сигналом внутрішнього таймера, який викликає програмне переривання, використовуючи один з каналів, і далі відбувається читання і перетворення інформації.

Дані спостережень записуються до файлу результатів в одиницях спектральної густини потоку радіовипромінювання ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ ). Для цього основною програмою передбачена підпрограма, яка за даними калібрування системи спостережень обчислює відповідні значення спектральної густини потоку радіовипромінювання. Дані, отримані в результаті калібрування, апроксимуються за допомогою методу найменших квадратів зі степеневим базисом. Встановлена таким чином залежність використовується для визначення за отриманими даними значень спектральної густини потоку радіовипромінювання, що зберігаються у вихідному файлі добових спостережень.

#### РАДІОХВИЛЬОВА ОБСТАНОВКА, ПЕРІОДИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТА МЕТОДИКА ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

З метою виявлення частотних діапазонів, вільних від людської діяльності в даній місцевості, була перевірена радіообстановка у пункті спостережень. Промінь антени, встановленої на висоті 30 м, по черзі направлявся на північ, схід, південь і захід. Вимірювання проводились в широкій смузі частот 30—300 МГц за допомогою селективного мікрровольтметра типу WMS-4. Смуга пропускання приймального радіоканалу була встановлена 120 кГц. Оскільки прилад WMS-4 має канал для слухового контролю, то переключанням амплітудної і частотної модуляції та прослуховуванням шумів можна було відносно легко виділити штучні сигнали, радіомовні і телевізійні канали. Після аналізу усередненого графіка зайнятості радіоєфіру було виявлено, що смуга частот від 105 до 160 МГц є вільною для спостережень. Решту займають телевізійні та радіоканали Харківської студії та сусідніх обласних центрів.

За розробленою методикою з 20 липня по 16 серпня 1999 р. проведено спостереження радіосплесків, а також фону на частоті 150 МГц. Сигнал реєструвався цілодобово у періоди з 20 по 24 липня та з 30 липня по 16 серпня, а 26 та 27 липня є лише кілька годин. Загальна тривалість спостережень складає 650 год.

Підвищення радіофону магнітосфери Землі у 4—10 разів на короткі проміжки часу (від кількох секунд до десятків секунд) спостерігалось дуже часто. Коротких сплесків було набагато більше, ніж таких, що мали тривалість декілька хвилин. Тому за параметр активності радіофону обрано число сплесків за кожні 0.5 год вище обраного рівня спектральної густини радіовипромінювання. Цей рівень визначався як  $\Pi_{0.5} \pm \sigma_{0.5}$ , де  $\Pi_{0.5}$  — середній рівень радіофону за кожні 0.5 год,  $\sigma_{0.5}$  — стандартні відхилення від цього рівня.

Довгі сплески тривалістю від 1 хв до кількох десятків хвилин спостерігались лише в активні періоди, і їхня кількість складала від 2—3 до 10—15 за добу.

## СОНЯЧНА АКТИВНІСТЬ ТА СПОРАДИЧНІ РАДІОСПЛЕСКИ

Висока щільність спорадичних радіосплесків обумовлена високою сонячною активністю. З табл. 1 видно, що за цей короткий період спостерігалось 26 сонячних спалахів балу 1 і два спалахи балу 2, які супроводжувались 23 рентгенівськими сплесками балу M.

Потужні спалахи балів 2F і 2N відбулися відповідно 23 і 29 липня. Решта спалахів були балів 1N або 1F, яскраві спалахи балу 1B відбулися 28, 30 липня і 2 серпня.

Таблиця 1. Кількість хромосферних спалахів балу вище 1F та інші індекси сонячної активності з 19 липня по 16 серпня 1999 р.

Дата, 1999	Кількість $H_{\alpha}$ -спалахів, балів		Кількість рентгенівських спалахів, балів			Кількість плям	Радіовипромінювання Сонця на хвилині 10.7 см
	$\geq 1S$	$\geq 2F$	C	M	X		
23.07	1	1	5	3	0	158	194
24.07	1	0	8	4	0	173	184
25.07	1	0	5	2	0	183	182
27.07	1	0	3	1	0	161	175
28.07	2	0	4	2	0	218	198
29.07	5	1	7	2	0	226	202
30.07	3	0	16	1	0	218	206
31.07	1	0	11	0	0	220	201
02.08	1	0	11	1	1	210	213
04.08	2	0	10	2	0	177	200
05.08	2	0	6	3	0	187	177
06.08	2	0	7	2	0	164	170
09.08	1	0	6	0	0	118	138
10.08	1	0	9	0	0	89	127
14.08	1	0	9	0	0	79	128
15.08	1	0	2	0	0	87	131

Варіації 3-год  $K_p$ -індексів геомагнітного поля на рівні поверхні Землі свідчать про те, що спалахи в період з 20 по 28 липня не були геоэффективними. Мінімальні коливання магнітного поля в цей же період були на геостаціонарних орбітах за вимірюваннями на супутниках GOES8, GOES10. Але після спалахів 28—29 липня у магнітосфері відбулася потужна магнітна буря з максимумом в 19<sup>h</sup>—22<sup>h</sup> UT 30 липня, якій передувало значне підвищення густини і амплітуди спорадичних радіосплесків в 16<sup>h</sup>—18<sup>h</sup> UT. На рис. 1 показано зміну спалахового індекса  $Q$  з часом, числа спорадичних радіосплесків на частоті  $f = 150$  МГц в період з 28 по 30 липня 1999 р. та вигляд цих сплесків з 16<sup>h</sup> по 18<sup>h</sup> UT 30 липня. Спалаховий індекс визначається як  $Q = It$ , де  $I$  — коефіцієнт, пропорційний балу та яскравості спалаху [11],  $t$  — тривалість спалаху у хвилинах. На жаль, вимірювання з 28 липня до 14<sup>h</sup> UT 30 липня не провадилися з технічних причин.

Рис. 1 показує, що після сонячно-активних днів 28 та 29 липня за  $Q$ -індексом підвищилась густина та амплітуда радіосплесків з 16<sup>h</sup>30<sup>m</sup> UT до 18<sup>h</sup> UT 30 липня. Додаткові дані з супутника ACE показують, що густина й швидкість сонячного вітру в міжпланетному просторі почали змінюватись о 6<sup>h</sup> UT 30 липня. В цей же час почалися змінюватися потоки енергійних електронів і магнітне поле Землі за вимірюваннями приладів на геостаціонарних супутниках Землі GOES8, GOES10. Ці дані вказують на те, що причиною виникнення низки процесів в магнітосфері Землі, в тому числі

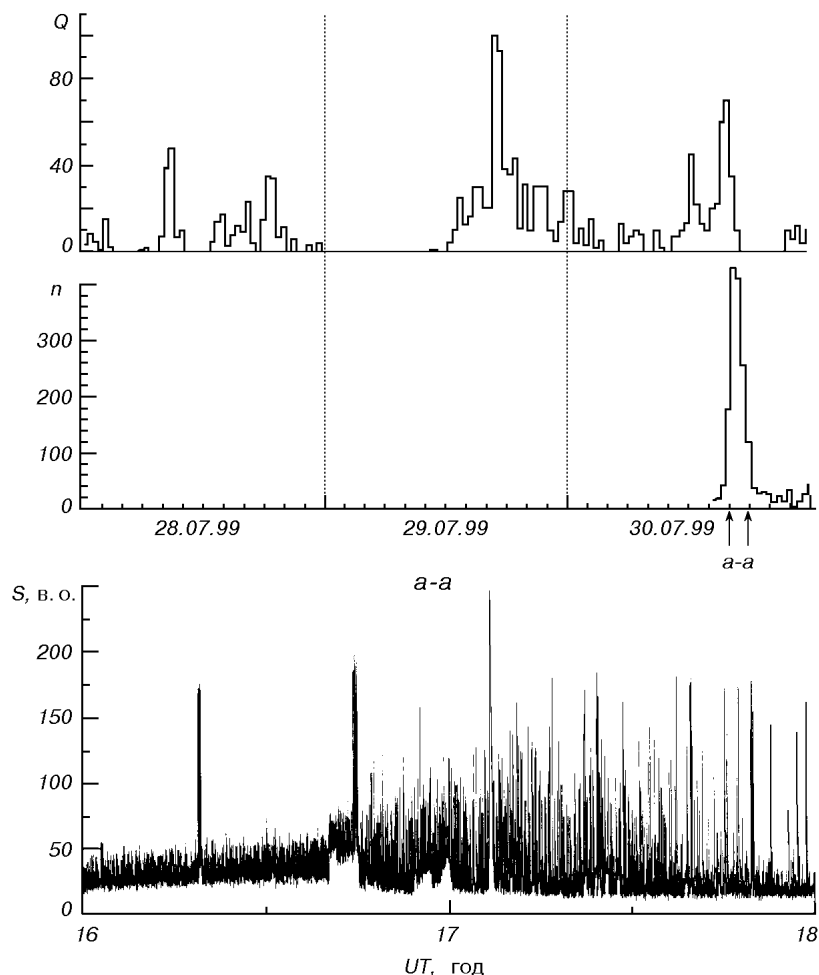


Рис. 1. Варіації сонячного спалахового індексу  $Q$  та щільності  $n$  спорадичних радіосплесків на частоті 150 МГц в період з 28 по 30 липня 1999 р. Внизу — двогодинний фрагмент запису інтенсивності  $S$  сплесків 30 липня

високочастотних спорадичних радіосплесків на середніх широтах, був яскравий сонячний спалах 28 липня балу 1В з координатами S19E03. Він відбувся у період з 8<sup>h</sup>05<sup>m</sup> до 9<sup>h</sup>02<sup>m</sup> UT і супроводжувався рентгенівським спалахом балу M2.3 і потужними радіосплесками на різних частотах.

Цей випадок підтверджує раніше встановлений факт про генерацію тривалих серій спорадичних радіосплесків через 1 — 2 доби після сонячних спалахів [8], що вказує на неоднорідності швидкісних потоків та ударних фронтів сонячного повітря як першопричину їхнього виникнення. Особливістю цього випадку було те, що сплески генеруються через декілька годин після приходу ударного фронту сонячної плазми до головної ударної хвилі земної магнітосфери.

#### ЕНЕРГІЙНІ ЕЛЕКТРОНИ НА ГЕОСИНХРОННИХ ОРБИТАХ ТА РАДІОСПЕСКИ

Характерною рисою випадку 30 липня 1999 р. було те, що майже одночасно з підвищенням швидкості та густини сонячного повітря в околицях головної ударної хвилі почала збільшуватись вертикальна складова земного магніт-

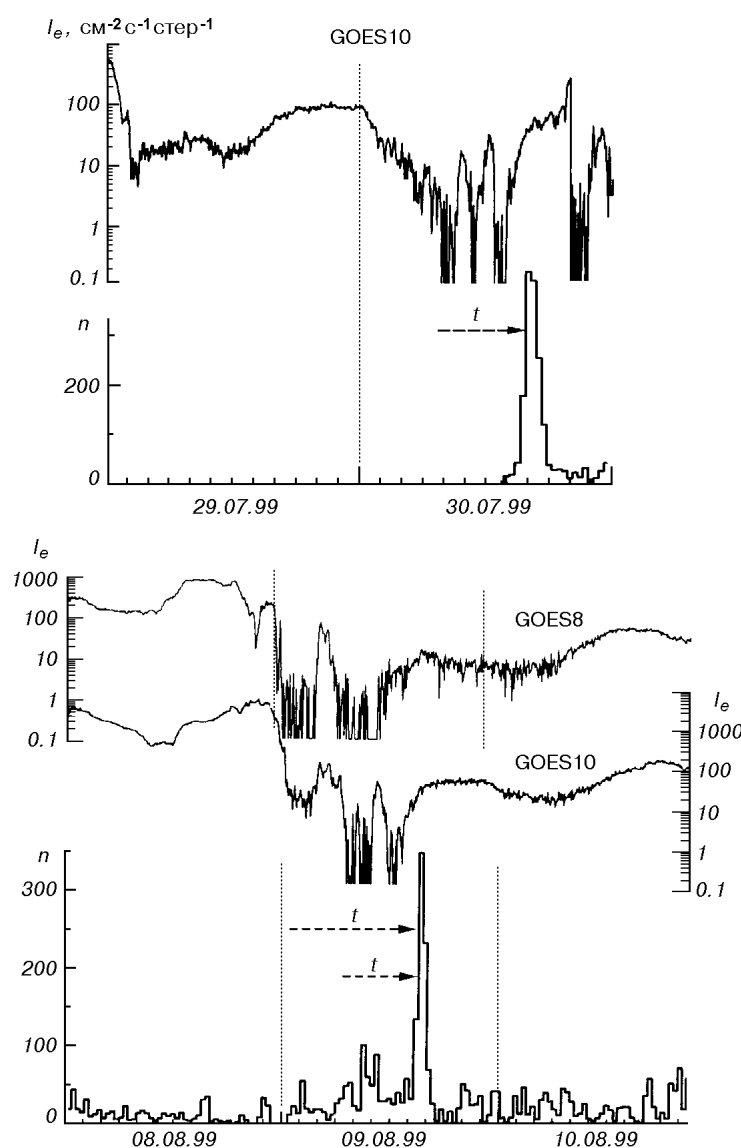


Рис. 2. Варіації потоків  $I_e$  енергійних електронів з  $E_e > 2$  MeV на висотах біля 36000 км за даними GOES8 і GOES10 і щільності  $n$  спорадичних радіосплесків для 29—30 липня та 8—10 серпня 1999 р.

ного поля на висотах 36000 км, а також зменшуватись потоки електронів з енергіями  $E_e > 2$  MeV на цих же висотах. Густина ж та інтенсивність радіосплесків підвищились лише через кілька годин. На рис. 2 показано зміну кількості спорадичних радіосплесків з 29 по 30 липня та з 8 по 10 серпня 1999 р., а також інтенсивності енергійних електронів з енергіями  $E_e > 2$  MeV за даними геостационарних супутників GOES8 та GOES10.

Дані про енергійні електрони характеризують поведінку зовнішньої границі зовнішнього радіаційного поясу Землі. Зменшення інтенсивності електронів в 10—100 разів 30 липня та 9 серпня вказує на порушення умов захоплення частинок і їхню інтенсивну дифузію завдяки неоднорідностям магнітного поля. Падіння інтенсивності електронів на 2-3 порядки 9 серпня зареєстровано як супутником GOES8, який має західну довготу  $76^\circ$ , так і

Таблиця 2. Порівняння моментів значних змін у розподілі енергійних електронів і щільності спорадичних радіосплесків

Дата, 1999	$t_e$ , год				$t_p$ , год		$T_p$ , год	$\Delta t_e$ , год		$\Sigma K_p$
	GOES8		GOES10					GOES8	GOES10	
30.07	0 UT	19 LT (29.07)	7 UT	22 LT (29.07)	15.5 UT	18.5 LT	2.5	15.5	8.5	31
09.08	0 UT	19 LT (08.08)	8 UT	23 LT (08.08)	16.5 UT	19.5 LT	2	16.5	8.5	27
12.08	8 UT	3 LT	10 UT	1 LT	11 UT	14 LT	2.5	3	1	21
14.08	6 UT	1 LT	—	—	10.5 UT	13.5 LT	3	4.5	—	11

GOES10, який має західну довготу 135°. Кількість радіосплесків значно підвищилась тільки через декілька годин після мінімумів інтенсивності частинок: для 30 липня — через 8.5 год після GOES10, а для 9 серпня — через 16.5 год після GOES8 та 8.5 годин після GOES10.

Крім цих двох випадків, за розглянутий період спостерігались ще два випадки підвищеного числа сплесків, що мали затримку по відношенню до значних варіацій інтенсивності електронів. Табл. 2 показує години появи значних зменшень потоків електронів  $t_e$  та підвищень числа радіосплесків  $t_p$  за світовим (UT) і місцевим (LT) часом для пункту прийому радіовипромінювання. Приведені також тривалість підвищеного числа сплесків  $T_p$ , затримка появи радіосплесків  $\Delta t_e$  в годинах, і  $\Sigma K_p$  — сума індексів магнітного поля Землі за добу. Видно, що зменшення потоків енергійних електронів за даними двох супутників починається в різні години за світовим часом, але ця різниця зменшується, якщо перейти на місцеві часи. Затримка появи значної кількості сплесків відносно аномалій потоків частинок, зареєстрованих двома супутниками, різна.

Можна бачити також, що зменшення потоків електронів відбувається, по-перше, неодноразово на обох супутниках; по-друге — в години, що відповідають затемненій стороні земної півкулі. Ці факти можуть свідчити про те, що причиною аномалій в поведінці частинок слугують нестационарні процеси в плазмі і магнітному полі геомагнітного хвоста магнітосфери Землі. В той же час значні підвищення густини спорадичних радіосплесків відбуваються як в денний, так і в нічний періоди. Іншою характерною особливістю є приблизно однакова тривалість підвищеного числа радіосплесків для всіх випадків. Вона вказує на накладання додаткових внутрішніх обставин на процес генерації сплесків. Питання про залежність радіофону від рівня збудженості магнітного поля Землі  $\Sigma K_p$  залишається відкритим, тому що 14 серпня магнітне поле було спокійним.

#### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Численні пошуки зв'язку спорадичного радіовипромінювання з сонячними спалахами показали, що більшість сплесків виникають через 1-2 доби після спалахів у оптичному діапазоні. Отже, ударні хвилі, що формуються в короні Сонця або в міжпланетному просторі, а також швидкісні потоки сонячного повітря спричиняють не лише магнітні збурення в земній магнітосфері, але й генерацію високочастотних радіосплесків. При цьому механізми передачі енергії усередину магнітосфери можуть бути різні.

Перші уявлення про «миттєву» генерацію високочастотних спорадичних радіосплесків після приходу ударного фронту сонячного повітря базувались на переносі альвенівських хвиль з області зіткнення швидкісного потоку з

головною ударною хвилею всередину магнітосфери та пітч-кутовому розсіюванні захоплених енергійних електронів на цих хвилях. Подальше їхнє висипання у конус втрат спостерігалось у вигляді короточасних сплесків синхротронного випромінювання у збудженому магнітному полі Землі [10].

Перевіркою гіпотези такого способу генерації спорадичних радіосплесків були б одночасні спостереження динаміки енергійних електронів та високочастотного радіофону магнітосфери, тому що розсіювання частинок на низькочастотних електромагнітних або альвенівських хвилях відбувається на всіх дрейфових  $L$ -оболонках. Табл. 2 показує, що існує вагома часова затримка між генерацією сплесків і зменшенням потоків енергійних електронів. Отже, хвиля збудженості повільно пересувається з зовнішніх шарів магнітосфери до внутрішнього радіаційного поясу. Такою повільною може бути радіальна дифузія електронів [6] зовнішніх шарів. Інжекція ж та прискорення частинок до високих енергій з одночасним захопленням на дрейфові оболонки може проходити досить ефективно під час магнітних збурень [5]. Досить чіткою при цьому є залежність глибини проникнення електронів від інтенсивності магнітної бурі.

Аномалії поведінки електронів на висотах 36000 км, що спостерігаються з затемненої сторони Землі, свідчать про інжекцію та прискорення їх з боку геомагнітного хвоста, а також розвиток різноманітних плазмових нестійкостей. Численні експериментальні дані супутників GEOTAIL і ISEE-3 вказують на можливість інжекції, прискорення електронів та іонів в області нейтрального шару та полярних каспів геомагнітного хвоста, а також спостережень різних плазмових і електромагнітних хвиль, формування плазмодів [8].

Автор вдячний В. В. Хижняку та І. В. Нечаєву за допомогу в розробці та виготовленні радіоприймальних трактів, а також Т. В. Малихіній за розробку програмного забезпечення для автоматизації спостережень.

1. Бондарь Л. Н., Стародубцев А. М., Троицкий В. С. Поиск спорадического радиоизлучения из космоса // *Успехи физических наук.*—1974.—113, № 4.—С. 719—723.
2. Дудник А. В., Минеев Ю. В. Динамика энергичных электронов и их взаимосвязь с высокочастотным радиоизлучением земной магнитосферы // *Геомагнетизм и аэронаука.*—1996.—36, № 1.—С. 93—102.
3. Мусатенко С. И. Дециметровое радиоизлучение околоземного пространства во время проявлений солнечной активности // *Геомагнетизм и аэронаука.*—1980.—20, № 3.—С. 482—488.
4. Мусатенко С. И. Радиоизлучение околоземного космического пространства как результат воздействия солнечных вспышек на магнитосферу и ионосферу Земли // *Геомагнетизм и аэронаука.*—1980.—20, № 5.—С. 884—888.
5. Тверская Л. В. Об инъекции пограничных электронов в магнитосферу // *Геомагнетизм и аэронаука.*—1986.—26, № 5.—С. 864—865.
6. Тверской Б. А. Динамика радиационных поясов Земли.—Москва: Наука.—1968.—172 с.
7. Троицкий В. С., Стародубцев А. М., Бондарь Л. Н. и др. Поиск спорадического радиоизлучения из космоса на сантиметровых и дециметровых волнах // *Известия ВУЗов, серия Радиофизика.*—1973.—16, № 3.—С. 323—341.
8. Baker D. N., Pulkkinen T. I. Large-scale structure of the magnetosphere // *New Perspectives on the Earth's Magnetotail* / Eds A. Nishida, D. N. Baker, S.W.H. Cowley. — Washington: American Geophysical Union.—1998.—P. 21—31.
9. Dudnik O. V. Precipitating radiation belt electrons as a source of high-frequency radio emission // *Radiation Measurements.*—1996.—26, № 3.—P. 395—397.
10. Dudnik A. V., Kartashev V. M., Lazarev A. V., Shmatko E. S. Recurrent high-speed stream of solar wind according to the date of near-Earth sporadic radio emission // *Proc. of 21st International Cosmic Ray Conference, Adelaide, Australia, 6-19 January, 1990.*—Vol. 7.—P. 34—37.
11. *Flare index.* Solar-geophysical data. Comprehensive reports. NGDC. Boulder. Colorado. USA.—January 2000.—665.—Part II.—P. 63—68.