

УДК 550.385.37; 550.388
№ держреєстрації 0115U004086
Інв. №

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
РАДІОАСТРОНОМІЧНИЙ ІНСТИТУТ
(РІ НАНУ)
61002, м. Харків - 2, вул. Червонопрапорна, 4
тел. (057) 706-14-15

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор РІ НАНУ
академік НАН України
д. ф.-м. наук, професор

_____ Л.М. Литвиненко
м.п.

« _____ » _____ 2015 р.

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

БАГАТОПОЗИЦІЙНІ ІОНОСФЕРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ
ПІДСУПУТНИКОВОГО СУПРОВОДУ НАЦІОНАЛЬНИХ І МІЖНАРОДНИХ
КОСМІЧНИХ ПРОЕКТІВ (ШИФР «ЛРУС»)

Етап № 1 «Наземно-космічні дослідження відгуків глобальних
електромагнітних резонаторів за 11-річний цикл сонячної активності»

Науковий керівник НДР
провідний науковий співробітник
д. ф.-м. наук, с.н.с.

_____ А.В. Залізовський

Харків – 2015
Результати роботи розглянуто Вченою Радою РІ НАН України,
протокол № 15 від 18 листопада 2015 р.

**НДР «БАГАТОПОЗИЦІЙНІ ІОНОСФЕРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ
ПІДСУПУТНИКОВОГО СУПРОВОДУ НАЦІОНАЛЬНИХ І МІЖНАРОДНИХ
КОСМІЧНИХ ПРОЕКТІВ» (ШИФР «ЛРУС»).**

Етап № 1 «Наземно-космічні дослідження відгуків глобальних
електромагнітних резонаторів за 11-річний цикл сонячної активності»

СПИСОК ВИКОНАВЦІВ

Керівник НДР

Пров.н.с., д.ф.-м.н., с.н.с

А.В. Залізовський

Заступник керівника НДР

С.н.с., к.т.н., с.н.с.

С.Б. Кащеєв

Відповідальні виконавці

Зав. відд., д.ф.-м.н.,

чл.-кор. НАНУ, проф.

Ю.М. Ямпольський

С.н.с., к.ф.-м.н., с.н.с.

О.В. Колосков

С.н.с., к.ф.-м.н., с.н.с.

Г.В. Литвиненко

Виконавці

Інженер 1 кат., PhD

Є.М. Занімонський

Інженер 1 кат.

І.І. Пікулік

Пров. інженер-дослідник

М.О. Бару

Пров. інженер-дослідник

А.М. Соїна

Пров. інженер-радіофізик

О.В. Пазнухов

Пров. інженер-радіофізик

В.М. Лисаченко

Підписи виконавців НДР завіряю.

Вчений секретар Радіоастрономічного інституту НАН України,
кандидат фіз.-мат. наук

А.П. Удовенко

1. Вступ

Взаємодія корпускулярних та радіаційних потоків, що надходять від Сонця, з магнітосферою та іоносферою Землі формує стан космічної погоди. Їх варіабельність породжує різноманітні просторово-часові плазмові неоднорідності та приводить у геокосмосі до збурень магнітних і електричних полів. У наднизькочастотному діапазоні варіації напруженості природних електромагнітних полів проявляються у відгуках трьох глобальних резонаторів [1]: шуманівського (ШР), іоносферного альфвенівського (ІАР) та магнітосферного (МР) (Рис. 1).

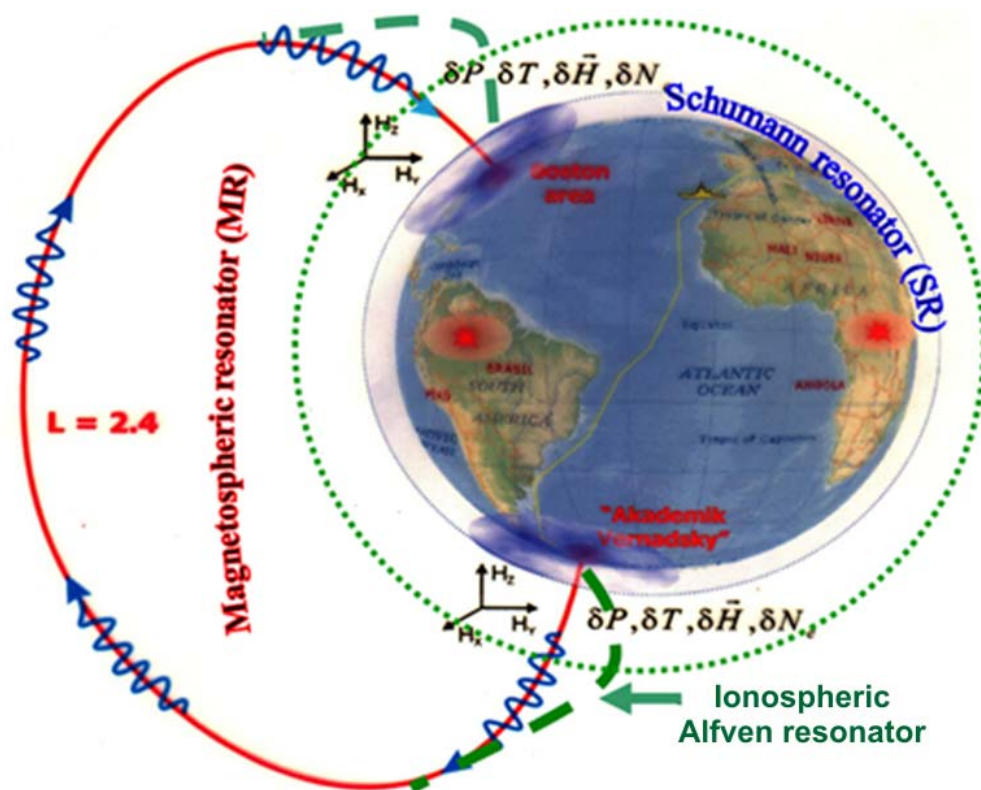


Рисунок 1 - Схема формування глобальних резонаторів: ШР, ІАР та МР.

Результати досліджень, що проводяться Радіоастрономічним інститутом НАН України на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» (УАС), на Низькочастотній обсерваторії РІ НАНУ (НЧО) та на обсерваторії SOUSY, яка розташована на о. Свалбард (Норвегія) дозволили

сформулювати новий науковий напрямок – «глобальні електромагнітні резонатори, як індикатори космічної погоди» [2]. В рамках НДР «Лірус» на етапі 2015 року багаторічні дані цих обсерваторій були використані для співставлення відгуків трьох глобальних резонаторів з супутниковими спостереженнями сонячної активності у 11-ти річному циклі.

УАС має унікальне географічне розташування у сенсі геокосмічних досліджень [3, 4]. УАС розташована у високих географічних (координати станції $65^{\circ}15'$ Півд. Ш, $64^{\circ}16'$ Західн. Д.), але у середніх геомагнітних широтах (скорегована геомагнітна широта дорівнює 50°). Велика відмінність географічної та геомагнітної широти спрощує селекцію процесів, що викликані динамікою нейтральної атмосфери або дією електромагнітних сил, які є наслідком сонячно-земної взаємодії. Рекордно низький рівень електромагнітних завад в Антарктиці, що обумовлено забороною будь-якої промислової діяльності, дозволяє вивчати дуже слабкі сигнали, що відображають фундаментальні процеси в системі атмосфера–іоносфера–магнітосфера. До них, зокрема, відноситься глобальна грозова активність, яка є важливим індикатором кліматичних змін [5]. Іншою особливістю УАС є магнітне сполучення з північно-східним узбережжям США, де сконцентрована велика кількість засобів діагностики геокосмосу. Це дозволяє вивчати поширення як природних сигналів [6] так і паразитного техногенного випромінювання між пікулями [7]. Перелічені фактори стимулювали виконавців НДР на створення на УАС унікального електромагнітного полігону призначеного, в тому, числі для підсупутникового супроводу національних і міжнародних космічних місій спрямованих на дослідження навколоземного простору.

На низькочастотній обсерваторії РІ НАНУ, яка розташована у селищі Мартова (Харківська область), у середніх географічних та геомагнітних широтах, також вже протягом більш ніж 5 років ведуться спостереження електромагнітних сигналів в УНЧ-ННЧ діапазонах. Треба відмітити, що на НЧО РІ НАНУ створено та постійно функціонує основний пункт

спостережень Системи Підсупутникового Іоносферного Моніторингу (СПІМ). Створення цього пункту на протязі останніх років підтримувалося фінансуванням в рамках Цільової програми НАН України з космічних досліджень. Доступ до поточної атмосферно-іоносферної інформації організовано в режимі реального часу за мережею Інтернет за адресою <<http://geospace.com.ua/data.html>>.

З вересня 2013 р. науковцями РІ НАНУ були започатковані аналогічні геокоосмічні дослідження в Арктиці. На норвезькій полярній обсерваторії SOUSY, яка розташована на о. Свалбард (79⁰ Півн. Ш.), було встановлено комплекс обладнання для реєстрації сигналів УНЧ-ННЧ діапазонів аналогічний тому, що експлуатується на УАС. Обсерваторія SOUSY, на відміну від УАС, має високоширотне розташування як з географічної, так і з геомагнітної точки зору. Цей пункт спостережень також забезпечено Інтернет доступом у реальному часі <http://geospace.com.ua/data/elf_spg.php>.

З точки зору геокоосмічних досліджень перспективним є багатопозиційний моніторинг сигналів, що сформовані глобальними резонаторами, у сильно просторово рознесених пунктах в Антарктиці на УАС, в Арктиці - SOUSY, та в середніх широтах на НЧО. В рамках звітнього етапу НДР «Лірус» характер поведінки УНЧ-ННЧ сигналів в 11-річному циклі сонячної активності проаналізовано за даними УАС, оскільки на теперішній час довжина безперервних експериментальних рядів дозволяє це зробити тільки на цій обсерваторії. Фрагментарні дані з НЧО та SOUSY поки використовуються для вивчення коротших природних циклів – добових, тижневих, сезонних та річних, а також для спорадичних збурень. В рамках даного етапу роботи проведено порівняння параметрів УНЧ-ННЧ випромінювання з планетарними і сонячними індексами, а також з даними супутникових вимірювань радіаційних та корпускулярних потоків енергії у навколоземному космічному просторі.

2. Огляд експериментальних даних в КНЧ–ННЧ діапазонах, які отримано в Україні, в Антарктиці та на о. Свалбард

У якості зразка спектрограм синхронних трипозиційних реєстрацій на УАС, НЧО та SOUSY наведено на рисунку 2. На всіх спектрограмах чітко

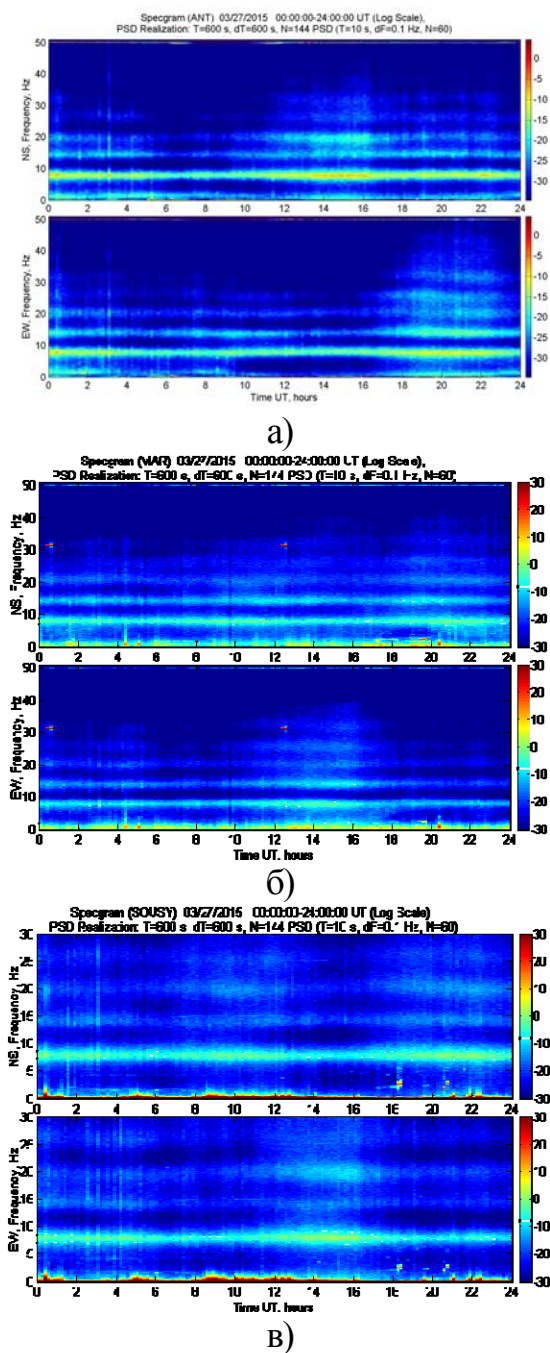


Рисунок 2 – Спектрограми електромагнітних сигналів за 27 березня 2015 р, що були прийняті на УАС (а), НЧО (б) та SOUSY (в).

простежуються перші чотири-п'ять власних резонансних мод ШР, що свідчить про достатню чутливість приймальних систем. У подальшому будемо аналізувати варіації параметрів першого шуманівського максимуму (ШР1), ІАР та пульсацій класу Рс1 за даними цих установок. Пульсації Рс3-Рс4 аналізуються за даними флюксгейт магнітометрів LEMI-008 та LEMI-017. Усі магнітометри, що їх встановлено на УАС та SOUSY, розроблено та виготовлено Львівським центром Інституту космічних досліджень НАНУ-ДКАУ.

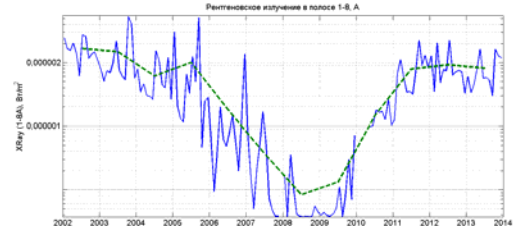
Радіаційна сонячна активність контролювалася за даними бортових рентгенівських реєстраторів, що були встановлені на супутниках: GOES-8 (2002-2003 роки), GOES-10 (2002-2009 роки), GOES-11 (2003-2011 роки), і GOES-12 (2003-2010 роки) [8]. Потужність потоку частинок, що висипаються у авроральній області, яка є гарною мірою корпускулярної активності Сонця, оцінювалася за даними супутника POES [9].

3. Аналіз реакції глобальних електромагнітних резонаторів за 11-річний цикл сонячної активності.

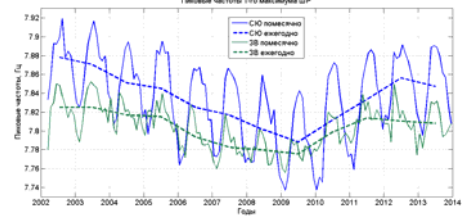
Проведено аналіз варіацій параметрів ШР1, ІАР та МР (пульсації Рс1, Рс3, Рс4) у 11-річному циклі сонячної активності за даними спостережень на УАС. На рисунку 3 наведено варіації параметрів глобальних резонаторів (ліві панелі) разом із індексами, що характеризують сонячну та геомагнітну активність (праві панелі), за 12-річний термін спостережень з 2002 по 2013 рік. Для ШР аналізувались варіації інтенсивності та пікової частоти першого резонансного мода ШР1, для інших резонаторів - частота спостереження ефектів, яка характеризує вірогідність їх збудження. Зазначимо також, що локальні К-індекси (рис. 3 н) оцінюються за даними, що реєструються на УАС. К-індекси відмінно корелюють з так званою НР auroral power, що характеризує інтенсивність висипань, в основному електронів, у авроральних областях і розраховується за супутниковими даними (на рис. 3 л наведено дані для південної півкулі).



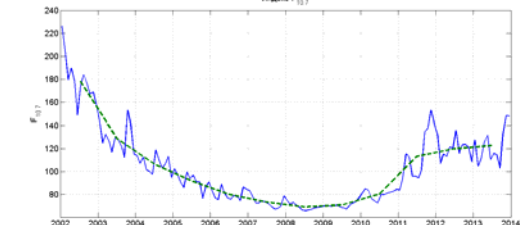
а)



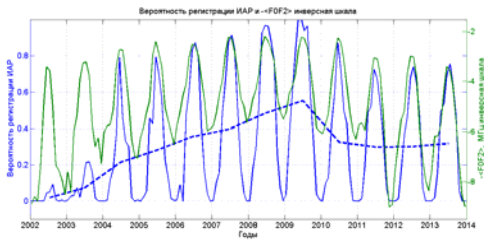
з)



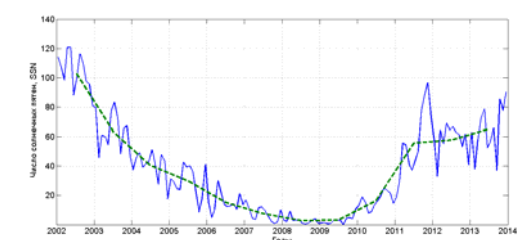
б)



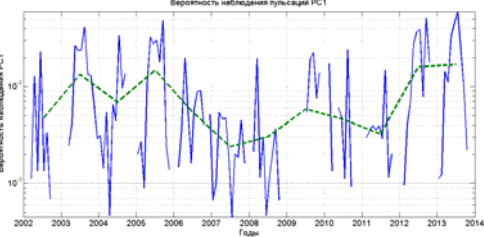
і)



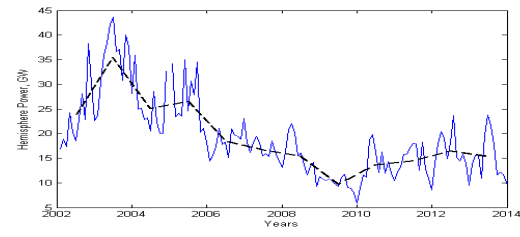
в)



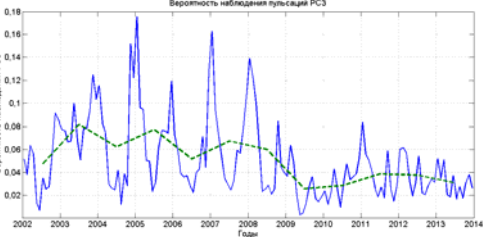
к)



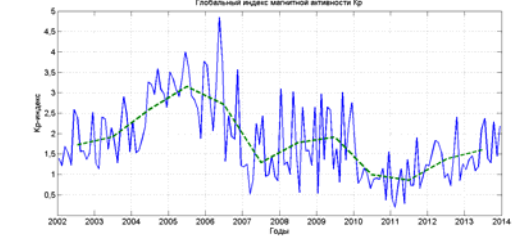
г)



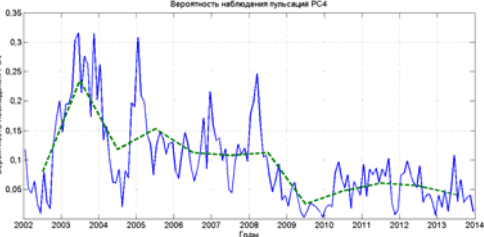
л)



д)



м)



е)



н)

Рисунок 3 – Інтенсивність першого шуманівського максимуму (а), частоти першого шуманівського максимуму в Н і D компонентах (б), ймовірності реєстрації ІАР разом із інвертованими критичними частотами іоносфери (в), ймовірності реєстрації РС1, логарифмічна шкала (г), РС3 (д) та РС4 (е), потік рентгенівського випромінювання Сонця (з), потік F10.7 (і), число сонячних плям (к), потужність потоку частинок, що висипаються у авроральній області південної півкулі за даними супутника POES (л), планетарні Кр індекси (м), місцеві К-індекси на УАС (н).

3.1 Шуманівський резонатор

ШР формується поверхнею планети і нижньою границею іоносфери. Він формує резонансну структуру електромагнітних шумів у КНЧ-ННЧ діапазонах. Інтенсивність ШР знаходиться у прямій залежності від сонячної активності (рис. 3). Порівнюючи інтенсивності і пікові частоти ШР1 (рис. 3 а, б) з потоком рентгена 1-8 Å (рис. 3 з, логарифмічний масштаб), можна помітити непогану відповідність рядів навіть у деяких деталях (збіг у часі локальних максимумів 2005 і 2011 років; але абсолютні мінімуми варіацій не збігаються: мінімум потоку рентгену спостерігається у 2008, інтенсивності ШР1 – у 2009 році). Це підтверджує гіпотезу Сатері-Вільямса [10] про важливу роль рентгенівського випромінювання у формуванні ШР. Так збільшення інтенсивності потоку рентгена під час сонячного максимуму характеристичному шарі (~90 км) і зменшує його висоту. В результаті пікові частоти та інтенсивності зростають.

Коефіцієнт кореляції між річними значеннями інтенсивності ШР1 і потоку рентгенівського випромінювання становить 0,90. Для пікових частот коефіцієнти кореляції складають 0,93 з каналом Північ-Південь (ПП) і 0,91 з каналом Захід-Схід (ЗС). Слід зазначити, що коефіцієнти кореляції інтенсивності з рештою параметрів також високі, не менше 0,8, включаючи 0,88 для зв'язку інтенсивності з К-індексами. Для пікових частот значення кореляції з К-індексами трохи менші, ніж з іншими параметрами. Коефіцієнт кореляції з числами Вольфа складає 0,89 (ПП) і 0,85 (ЗС), з F10.7 - 0,88 і 0,82, відповідно. Зазначимо, що всі коефіцієнти кореляції для пікових частот каналу ПП вищі, ніж для каналу ЗС. Таким чином, корпускулярна складова активності Сонця має дещо менший вплив на пікові частоти ШР, ніж радіаційна частина.

Зіставлення інтенсивності ШР1 (рис. 3 а) із середнім локальним К-індексом на УАС (рис. 3 н) показує добру відповідність варіацій обох рядів.

Звертає на себе увагу той факт, що планетарний Кр індекс демонструє іншу поведінку (рис. 3 м), і його варіації мало схожі на зміни інтенсивності ШР1.

Зазначимо, що гіпотеза Вільямса про зв'язок інтенсивності ШР на УАС з локальними збуреннями місцевої іоносфери через висипання іонізованих часток [11] не позбавлена підстав. Висипання впливають на характеристичну область нижньої іоносфери, а підвищена корпускулярна активність (Сонячний вітер) модулює потоки галактичних космічних променів (Форбуш ефект). Всі ці фактори можуть мати вплив на параметри ШР1, й будуть предметом подальшого аналізу в майбутньому.

3.2 Іоносферний альвенівський резонатор

Нижньою границею іоносферного альвенівського резонатору являється Е область іоносфери, верхня границя формується у зовнішній іоносфері на висотах, де різко змінюється альвенівська швидкість. Ймовірності спостереження ІАР (синім) спільно з середньомісячними значеннями F_oF_2 з інвертованою шкалою (зеленим) за 12 років спостережень наведено на рисунку 3 в. У цілому, частота спостереження ІАР знаходиться у зворотному зв'язку із сонячною активністю. Можна відзначити високу антикореляцію середньомісячної частоти спостереження ІАР з критичною частотою області F2 іоносфери (рис. 3 в). Вона добре проявляється у зимові та перехідні місяці, коли критичні частоти іоносфери мінімальні. Влітку ймовірність спостереження ІАР падає практично до нуля. Тобто, зв'язок не є лінійним при великих критичних частотах. У 11-річному циклі частота появи ІАР краще корелює з інвертованим локальним К-індексом, ніж з критичними частотами. Тобто, суттєвий вплив на появу ІАР має також корпускулярна активність Сонця. За середньомісячними даними єдина значуща кореляція присутня з критичною частотою (коефіцієнт кореляції дорівнює -0,81). На коротких масштабах часу ймовірність появи ІАР повністю контролюється цим параметром. За середньорічними даними коефіцієнт кореляції з критичною

частотою також становить $-0,81$. Слід зазначити, що для усереднених за рік даних стають значущими коефіцієнти кореляції ймовірності спостереження IAP і з іншими параметрами, що характеризують сонячну активність (наприклад, модуль коефіцієнту кореляції з потоком рентгенівського випромінювання дорівнює $0,9$).

3.3 Пульсації класу Pc1

Такі квазігармонічні коливання магнітного поля (періоди $0,2-5$ с) є наслідком іонних гірорезонансів, що виникають у магнітосфері на різних висотах та L-оболонках. Ймовірності спостереження пульсацій Pc1 у логарифмічному масштабі наведено на рисунку 3 г. Видно, що варіації появи Pc1 непогано корелюють з планетарним Kp індексом (рис 3 м). Присутній також зв'язок і з потоком рентгенівського випромінювання (рис 3 з). Кількісно коефіцієнти кореляції як з потоком рентгенівського випромінювання, так і з Kp, приблизно однакові. Максимальною є кореляція частоти появи пульсацій класу Pc1 з локальними індексами геомагнітної активності (рис. 3 н). Отже більш важливу роль у появі Pc1 відіграє корпускулярна активність Сонця, що викликає різноманітні збурення в авроральних областях.

3.4 Пульсації класу Pc3

Природа пульсацій Pc3 (періоди від 10 до 45 с) може бути пов'язана з полоїдальними резонансами МГД хвиль у плазмосфері або з резонансними тороїдальними альвенівськими коливаннями в магнітосфері уздовж силових ліній магнітного поля у середніх геомагнітних широтах. Частоту спостереження пульсацій Pc3 у лінійному масштабі наведено на рисунку 3 д. Як видно, у роки високої сонячної активності має місце суттєва сезонна варіація появи Pc3 із гострим максимумом у літній час, тоді як у роки малої

активності Сонця сезонний хід цього параметру зникає. Кількісно кореляція з К-індексом досить висока, коефіцієнт кореляції дорівнює 0,83 для середньорічних значень, і 0,8 – а для середньомісячних. З Кр індексами коефіцієнт кореляції дорівнює 0,69 і 0,51, відповідно. З інших параметрів можна відзначити хіба що індекс F10.7, однак кореляція з ним (0,68 для річних значень і 0,52 – для місячних) значно менша, ніж з К-індексами. Можна зробити ті ж висновки, що справедливі для Pc1: основний вплив на частоту появи Pc3 має корпускулярна активність Сонця, яка активізує висипання часток у авроральних областях (рис. 3 л) й проявляється у локальних К-індексах (рис. 3 н).

3.5 Пульсації класу Pc4

Природа пульсацій Pc4 (періоди 45-150 с) якісно така ж, як і для Pc3. Але резонансні МГД коливання магнітного поля з періодами Pc4 виникають переважно у більш високих геомагнітних широтах, де довжина L-оболонок зростає. Ймовірність спостереження цих коливань у лінійному масштабі наведена на рисунку 3 е. Порівняння частоти спостереження пульсацій Pc4 з планетарним Кр індексом (рис. 3 м) і потоком рентгенівського випромінювання (рис. 3 з) показує не дуже гарну відповідність цих варіацій. Найкраща кореляція частоти появи Pc3 спостерігається з локальним К-індексом. За річними даними кореляція з планетарним Кр індексом вища, ніж з локальним (0,76 проти 0,72). Коефіцієнти кореляції з іншими параметрами нижчі (від 0,63 до 0,67). За середньомісячними даними значущий коефіцієнт кореляції має місце тільки з локальними К-індексами. Отже, для мікропульсацій класу Pc4 справедливі ті ж висновки, що було зроблено для Pc1 та Pc3: найбільшу роль у їх генерації відіграє джерело, яке ініційоване корпускулярною сонячною активністю та авроральними активаціями (Рис. 3 л).

4. Висновки

У підсумку можна сформулювати основні результати поведінки трьох глобальних резонаторів – ШР, ІАР та МР у повному 11-річному циклі сонячної активності.

1. Наглядно продемонстровано, що глобальні природні електромагнітні резонансні структури можуть бути використані як індикатори сонячно-земної взаємодії і стану космічної погоди.
2. Поведінка характеристик ШР та ІАР віддзеркалює варіації радіаційної іонізуючої компоненти сонячного випромінювання і дозволяє контролювати іоносферні характеристики.
3. Поведінка магнітосферних резонансів класів Pc1, Pc3, Pc4 переважно контролюється корпускулярною сонячною активністю, яка приводить до авроральних активацій і збурень магнітного поля Землі.
4. Знаходження таких закономірностей на прикладі детермінованого у часі 11-ти річного циклу дозволяє моделювати і прогнозувати поведінку геокосмосу під час інших спорадичних сонячних збурень.

Література

1. Электромагнитное окружение Земли в СНЧ-диапазоне / В.Г. Безродный, О.В. Буданов, А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский // Космічна наука та технологія. – 2003. - Т. 9, № 5/6. - С. 117-123
2. Околоземные резонаторы СНЧ-волн как индикаторы космической погоды / А.В. Колосков, В.Г. Сеницын, Н.Н. Герасимова, Ю.М. Ямпольский // Космічна наука і технологія. – 2008. - Т. 14, №5, - С. 49-64.
3. Zalizovski A.V. The role of the ozonosphere in the interaction between atmospheric layers as deduced from observation at the Antarctic base “Akademik Vernadsky” / A.V. Zalizovski // International Journal of Remote

Sensing. – 2011. – 32(11). – P. 3187-3197. DOI:
10.1080/01431161.2010.541511.

4. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности / А.В. Колосков, В.Г. Безродный В.Г., О.В. Буданов, [и др.]. // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2005. - Т. 10, № 1. - С. 11-29.
5. Williams E.R. The Schumann resonance: A global tropical thermometer / Science. - 1992, - V. 256, - P. 1184-1187.
6. Spatial field structure and polarization of geomagnetic pulsations in conjugate areas / V.G. Sinitsin, Yu.M. Yampolski, A.V. Zalizovski, [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2003. – Vol. 65, No. 10. – P. 1161-1167.
7. Колосков А.В. Наблюдения излучения энергосистем Североамериканского континента в Антарктике / А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. - Т. 14, № 4. – С. 367-376.
8. Режим доступа [http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_full/].
9. Режим доступа [<http://legacy-www.swpc.noaa.gov/ftplib/lists/hpi/>].
10. Response of the cavity resonator to the 11-year solar cycle / G. Satori, E. Williams, V. Mushtak and M. Füllekrug // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. - 2005. - 67. - P. 553-562.
11. Global Circuit Response to the 11-Year Solar Cycle: Changes in Source or in Medium? / E. Williams, A. Guha, R. Boldi, G. Satori, R. Markson, A. Koloskov, Y. Yampolski // XV International Conference on Atmospheric Electricity, Norman, Oklahoma, U.S.A, 15-20 June 2014, 12 p.