

УДК 523.164.42

М. М. Калініченко¹, О. О. Коноваленко¹, Я. С. Яцків², Л. М. Литвиненко¹,
В. В. Доровський¹, А. І. Браженко³, М. Р. Оляк¹, О. О. Литвиненко¹, В. М. Мельник¹

¹ Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

² Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

³ Гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики Національної академії наук України, Полтава

ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ СОНЦЯ, ЗБУРЕНЬ СОНЯЧНОГО ВІТРУ ТА ІОНОСФЕРИ ЗЕМЛІ З ДОПОМОГОЮ УКРАЇНСЬКОЇ СИСТЕМИ ДЕКАМЕТРОВИХ РАДІОТЕЛЕСКОПІВ УРАН ТА КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Досліджено властивості коронального викиду маси, який рухався у бік Землі і не був зареєстрований космічними і наземними коронографами. Доведено незамінність наземних радіоспостережень у випадках центрально-розташованих корональних викидів маси. Досліджено зв'язок між швидкістю сонячного вітру в широкому діапазоні геліоширот і виникненням геомагнітних збурень. Показано, що збільшення швидкості сонячного вітру в широкому діапазоні геліоширот, яке спостерігається радіоастрономічними методами, може свідчити про високу ймовірність виникнення геомагнітного збурення.

Ключові слова: декаметровий діапазон, сонячні радіосплески, сонячний вітер, іоносфера, мерехтіння.

ВСТУП

Активні процеси на Сонці (корональні викиди маси (КВМ), спалахи) призводять до збурень міжпланетної плазми, магнітосфери та іоносфери Землі, порушень систем зв'язку та енергопостачання наземного та космічного базування, а в цілому — до погіршення стану космічної погоди [6]. Значний внесок у дослідження зв'язків між процесами на Сонці, в сонячному вітрі, магнітосфері та іоносфері Землі вносять космічні апарати STEREO [<http://stereo.gsfc.nasa.gov/spacecraft.shtml>], SOHO [<http://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html>], «Wind» [<http://wind.nasa.gov/>] та ін. Наземні радіотелескопи, які за деякими своїми параметрами, зокрема за чутливістю, часто переважають приймальну апаратуру

космічних апаратів, дозволяють ефективно доповнювати роботу систем космічного базування шляхом надання інформації, недоступної для космічних апаратів. Наприклад, оптичні коронографи (один з основних інструментів на борту космічних апаратів) дозволяють отримувати лише проекцію швидкості КВМ на картинну площину. При цьому реальна швидкість може перевищувати виміряну коронографом у декілька разів, що може призвести до істотної помилки прогнозу часу приходу КВМ до Землі. Між тим швидкість КВМ може бути незалежно оцінена з даних спостережень радіосплесків II та IV типів [3], які генеруються у процесі формування КВМ. І хоча спостереження радіосплесків також проводяться на космічних апаратах, чутливість таких вимірювань значно нижча за чутливість, яка реалізується на наземних радіотелескопах. Це пояснюється тим, що антена для прийому радіовипромінювання на борту космічного апарата зазвичай складається з одного диполя, а антена

© М. М. КАЛІНІЧЕНКО, О. О. КОНОВАЛЕНКО,
Я. С. ЯЦКІВ, Л. М. ЛИТВИНЕНКО, В. В. ДОРОВСЬКИЙ,
А. І. БРАЖЕНКО, М. Р. ОЛЯК, О. О. ЛИТВИНЕНКО,
В. М. МЕЛЬНИК, 2015

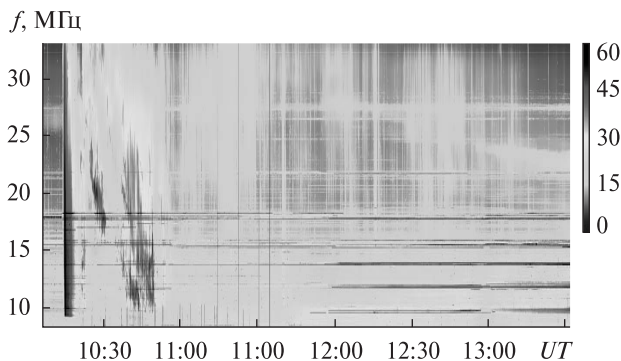


Рис. 1. Динамічний спектр сплесків II та IV типів, які спостерігалися 22 серпня 2014 р. на радіотелескопах УТР-2 і УРАН-2

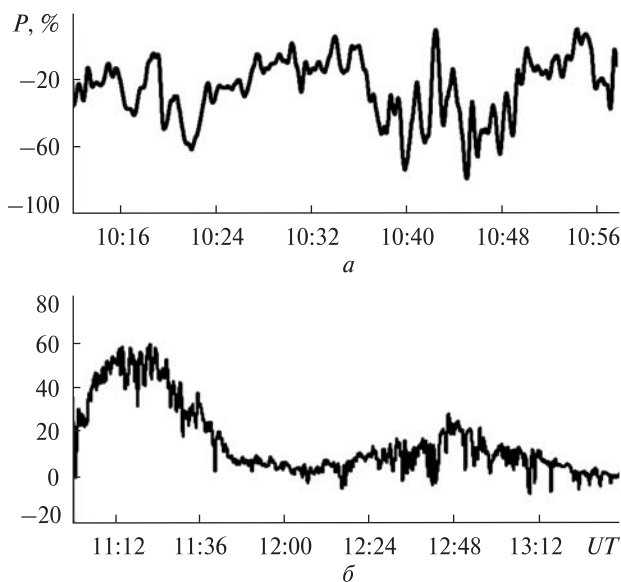


Рис. 2. Поляризаційні профілі сплеску II типу на частоті 12 МГц (а) та сплеску IV типу на частоті 30 МГц (б) за даними спостережень на радіотелескопі УРАН-2 (Полтава)

наземного радіотелескопа — із сотні і навіть тисячі елементів. Локальний характер вимірювань на борту космічних апаратів не гарантує також реєстрацію всіх збурень сонячного вітру, які рухаються до Землі. Особливо це стосується порівняно компактних збурень міжпланетної плазми, викликаних КВМ, які часто викликають магнітні бурі. Тим часом спостереження міжпланетних мерехтінь великої кількості космічних радіоджерел з різними координатами дозволяють надійно виявляти збурення міжпланетної плазми, ви-

значати спектри плазових неоднорідностей і швидкість сонячного вітру [5, 8]. Україна володіє унікальною системою декаметрових радіотелескопів УРАН яка дозволяє комплексно вивчати всі ланки сонячно-земних зв'язків: Сонце, міжпланетну плазму, іоносферу Землі.

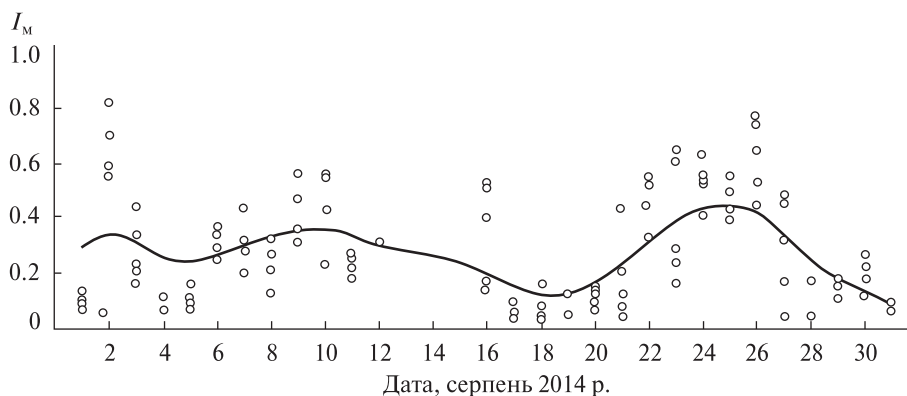
Мета роботи — пошук зв'язків між процесами на Сонці, в сонячному вітрі та іоносфері Землі шляхом проведення радіоастрономічних спостережень на радіотелескопах системи УРАН, із залученням даних космічних апаратів.

СИНХРОННІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ КВМ, ЯКИЙ НЕ БУВ ЗАРЕЄСТРОВАНІЙ КОСМІЧНИМИ АПАРАТАМИ

З травня по вересень 2014 р. провадився моніторинг спорадичного радіовипромінювання Сонця синхронно на радіотелескопах УТР-2 (Гракове) та УРАН-2 (Полтава) [1, 7]. За увесь період спостережень було зареєстровано два потужні сплески II типу: 10 червня та 22 серпня 2014 р. Для подальшого аналізу було обрано сплеск 22 серпня 2014 р. Попередній аналіз показав, що цей сплеск був ймовірно пов'язаний з КВМ, який виник над центрально-розташованою активною областю, розповсюджувався безпосередньо в напрямку Землі і не був зареєстрований космічними та наземними коронографами. Натомість КВМ 10 червня 2014 р. був виключно лімбовою подією і був добре видимий.

Корональним викидам маси 22 серпня 2014 р. передувала спалах над активною областю NOAA 12146, яка розташовувалась майже на центральному меридіані Сонця. Починаючи з 10:21 UT на радіотелескопах УТР-2 і УРАН-2 реєструвався сплеск II типу (який зазвичай супроводжується КВМ) з потоком, який перевищував 10000 с. о. п. (рис. 1). Сплеск II типу складався з двох розділених у часі частин. Перша частина, яка тривала з 10:21 до 10:31 UT, мала характерний для цього типу сплесків частотний дрейф 33 кГц/с. Такий дрейф відповідає швидкості джерела приблизно 500 км/с. З 10:33 до 10:55 UT тривав сплеск II типу з ялинковою структурою та майже нульовим частотним дрейфом. Це означає, що перша частина сплеску генерувалася на передній ділянці фронту ударної хвилі, яка породжена СМЕ,

Рис. 3. Індекс I_M іоносферних мерехтінь у серпні 2014 р. за даними спостережень на радіотелескопі УРАН-4 (Одеса)



тоді як джерело сплеску з ялинковою структурою і незначним або нульовим частотним дрейфом перебувало на бокових ділянках ударної хвилі, яка поширювалася поперек градієнту густини. З характерних властивостей даного сплеску також можна відзначити наявність випромінювання на другій гармоніці локальної плазмової частоти, що разом з потоком також є ознакою високого ступеня турбулентності в області генерації. Одночасно з початком сплеску II типу розпочався сплеск IV типу (зазвичай асоціюється з тілом КВМ) (рис. 1), який тривав більше 2.5 год і у максимумі по потоку перевищував рівень спокійного Сонця на 12 дБ. У сплеску IV типу прослідковувалися квазіперіодичні структури з періодом 40, 10 і 5 хв.

Поляризаційний профіль сплеску II типу представлено на рис. 2, а. Спостерігається високий ступінь поляризації (до -60%) випромінювання на ділянках, де виявляється ялинкова структура. Ступінь поляризації випромінювання сплеску IV типу також високий, але знак поляризації зворотний ($+60\%$) (рис. 2, б). Протилежний знак поляризації сплесків II типу і IV типів вказує на різний напрямок руху їхніх джерел.

Зважаючи на потужність та структуру сплеску II типу, слід було очікувати помітні події в оптичному діапазоні. Тим не менш жодному з коронаграфів (STEREO A, Cor1 та Cor2, STEREO B, Cor1 та Cor2, SOHO-LASCO, C2 та C3) не вдалося зафіксувати жодних помітних корональних структур, які були б проявом поширення КВМ. Однак через 116 год після реєстрації сплеску II

типу в декаметровому діапазоні довжин хвиль на Землі спостерігалася потужна геомагнітна буря ($D_{st} \approx 80$ нТл). Час початку бурі добре узгоджується з часом приходу ймовірного КВМ. Даний факт може пояснюватись тим, що спричинений спалахом над центральною частиною сонячного диску КВМ скоріш за все поширювався безпосередньо в напрямку Землі, а тому був екранований дисками коронаграфів. Крім того, для супутників STEREO дана подія була залімбовою, а КВМ рухався від космічних апаратів, за Сонцем. На користь події КВМ 22 серпня 2014 р. ймовірно говорить також факт підвищення індексу іоносферних мерехтінь з 22 по 28 серпня з максимумом 25 серпня 2014 р. за даними нашого моніторингу іоносферної плазми на радіотелескопі УРАН-4 (рис. 3).

ЗВ'ЯЗОК МІЖ ШВИДКІСТЮ СОНЯЧНОГО ВІТРУ ТА ГЕОМАГНІТНОЮ АКТИВНІСТЮ ПО ДАНИМ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

Практично з початку спостережень сонячного вітру вивчався вплив збурень сонячного вітру на виникнення геомагнітних бур. Один з найважливіших напрямків у цих дослідженнях — зіставлення даних радіоастрономічних спостережень і геомагнітної активності. Найчастіше в цьому випадку розглядається зв'язок між зміною індексів геомагнітної активності та індексом міжпланетних мерехтінь при кутах елонгації ϕ , менших 90° [2]. Використання декаметрового діапазону довжин хвиль дозволяє досліджувати не тільки внутрішні, а й зовнішні області міжпланетного

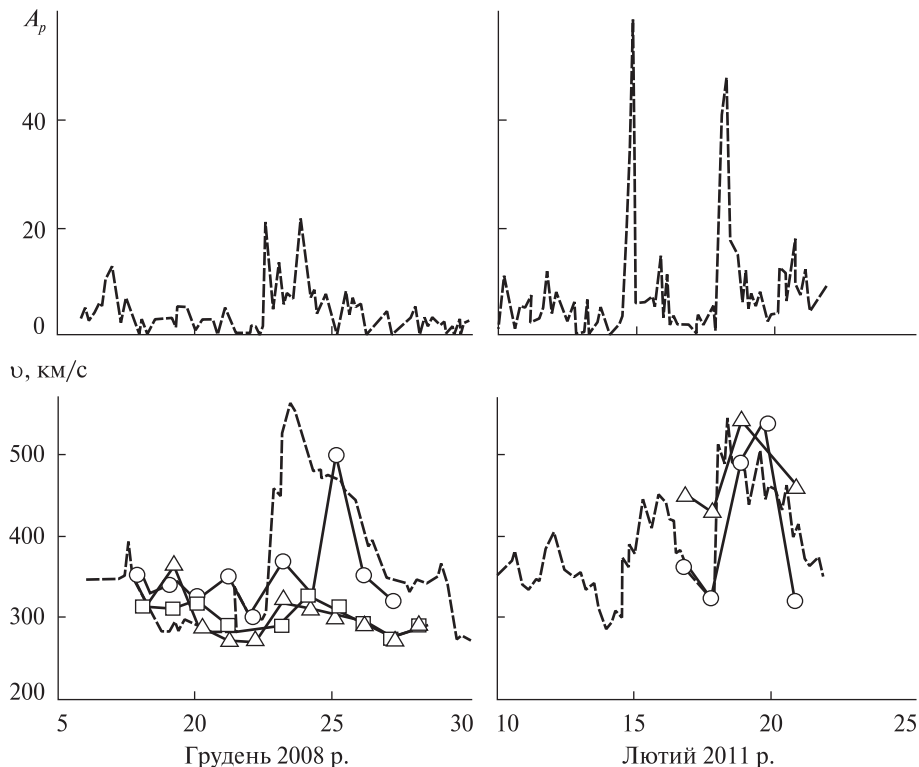


Рис. 4. Часові варіації геомагнітного індексу A_p та швидкості v сонячного вітру *in situ* (штрихові лінії) і швидкості v , яка визначається зі спостережень міжпланетних мерехтін (радіотелескопи УТР-2 та УРАН-2) низькоширотного радіоджерела 3С144 (кружки) і більш високоширотних радіоджерел 3С196 і 3С254 (відповідно трикутники і квадратики)

середовища при кутах елонгації $\varphi \geq 90^\circ$, де протяжність розсіювального шару може становити кілька астрономічних одиниць і охоплювати області швидкого і повільного сонячного вітру.

Метою даного дослідження було вивчення особливостей високошвидкісних потоків сонячного вітру і їхнього впливу на виникнення помірних геомагнітних збурень при середньодобових значеннях геомагнітних індексів $A_p \leq 50-60$. В роботі аналізувалась швидкість сонячного вітру, визначена із спостережень міжпланетних мерехтін на радіотелескопах УТР-2 і УРАН-2 при кутах елонгації $\varphi \geq 90^\circ$, спільно з *in situ* параметрами сонячного вітру на рівні орбіти Землі і геомагнітними індексами A_p . Спостереження на УТР-2 і УРАН-2 проводилися в 2003 — 2011 рр. на робочій частоті $f_0 = 25$ МГц. Для дослідження були відібрані інтервали тривалістю не менше 4 днів, коли спостереження проводилися на декількох геліоширотах і було зафіксовано збіль-

шення швидкості сонячного вітру до значень $v \geq 500$ км/с.

Перша група даних включає часові інтервали поблизу максимуму сонячної активності, а саме у березні і квітні 2003 р., а також у лютому 2011 р. На рис. 4, а наведено графіки швидкості v сонячного вітру *in situ* [Database of CELIAS/MTOF proton monitor on the SOHO spacecraft. — <http://umtof.umd.edu/pm/crn/>] і швидкості, визначеної із спостережень міжпланетних мерехтін радіоджерел 3С144 (геліоширота $\beta = -1.3^\circ$) і 3С196 ($\beta = 27.57^\circ$). Ми бачимо помітне збільшення швидкості сонячного вітру на різних геліоширотах. Значення швидкості сонячного вітру, отриманої зі спостережень мерехтін 3С 144 і 3С196, відповідають даним швидкості *in situ* із запізненням відповідно 2 і 1 дні.

Порівняння з даними архіву IAS-MEDOC [<http://idc-medoc.ias.u-psud.fr/>] засвідчило, що збільшення швидкості сонячного вітру поблизу

Землі приблизно 14—15 лютого було викликане високошвидкісним потоком з корональної діри. Різке зростання швидкості, що спостерігалось поблизу Землі приблизно 18 лютого, може бути пов'язане зі спалахом X2-класу і викидом корональної маси. На рис. 4, б наведено графіки геомагнітних індексів A_p [Database of World Data Center for Solar-Terrestrial Physics, Moscow. — <http://www.wdcb.ru/stp/data/geomagni.ind/>]. Можна відзначити помітне збільшення значень A_p 14 і 18 лютого, що свідчить про виникнення геомагнітних збурень. Збільшення швидкості сонячного вітру у березні 2003 р. і у квітні 2003 р. також може бути пов'язане переважно з високошвидкісними потоками з корональних дір (див. дані IAS-MEDOC). У той же час різке зростання швидкості, що спостерігалось поблизу Землі приблизно 20 березня може бути пов'язане зі спалахом класу X1, що мав місце 17 березня. Згідно з даними моніторингу у березні та квітні 2003 р. мало місце помітне збільшення значень A_p ($h \geq 50$). Радіоастрономічні спостереження на радіотелескопі УТР-2 у ці періоди часу також показали збільшення швидкості сонячного вітру в широкому діапазоні геліоширот.

У другу групу увійшли дані, які відповідають мінімуму сонячної активності в листопаді 2007 р. та грудні 2008 р. На рис. 4, в приведені графіки швидкості сонячного вітру *in situ* і швидкості, визначеної із спостережень міжпланетних мерехтінь радіоджерел 3C144 (геліоширота $\beta = -1.3^\circ$), 3C196 ($\beta = 27.57^\circ$) і 3C254 ($\beta = 32.54^\circ$) у грудні 2008 р. Ми бачимо, що збільшення швидкості спостерігалось виключно поблизу площини екліптики. Згідно з даними архіву IAS-MEDOC підвищення швидкості пов'язане із проходженням поблизу Землі високошвидкісного потоку від корональної діри. Крім того, спостереження мерехтінь 3C144 показало запізнення збільшення швидкості порівняно із швидкістю *in situ* на два дні. Також можна відзначити досить низькі значення геомагнітного індексу A_p (рис. 1, з). Аналогічні результати отримано для листопада 2007 р.

Необхідною умовою для виникнення геомагнітного збурення є наявність негативного (південного) компонента міжпланетного магнітного

поля $B_z < -5$ нТл [4]. Автори виділяють два види сонячно-земних подій, які призводять до геомагнітних збурень. Перший — це корональний викид маси, який породжує магнітну хмару і область стиснення перед нею з південним компонентом магнітного поля. Другий — корональна діра, яка є джерелом швидкого сонячного вітру, на кордоні якого формується область стиснення із $B_z < 0$. У березні 2003 р. у період спостережень на УТР-2 згідно з даними Database of ACE Science Center from ACE spacecraft [<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/>] мали місце помітні коливання перпендикулярного до площини екліптики B_z -компонента міжпланетного магнітного поля з мінімальним значенням $B_z \approx -7.1$ нТл 20 березня при середньодобовому значенні $\bar{B}_z \approx -0.85$ нТл. Мінімальне значення південного компонента міжпланетного магнітного поля у квітні 2003 р. становило $B_z \approx -6$ нТл (25 квітня) при середньодобовому значенні $\bar{B}_z \approx -1.7$ нТл. У лютому 2011 р. мінімальне значення складо $B_z \approx -8.8$ нТл 18 лютого і $B_z \approx -5.3$ нТл 19 лютого при середньодобових значеннях відповідно $\bar{B}_z \approx 4$ нТл і $\bar{B}_z \approx -1.8$ нТл. У листопаді 2007 р. і грудні 2008 р. мали місце переважно незначні коливання B_z -компонента міжпланетного магнітного поля, мінімальне значення якого складо $B_z \approx -6$ нТл 16 листопада 2007 р. і $B_z \approx -6.5$ нТл 22 грудня 2008 р. при середньодобових значеннях відповідно $\bar{B}_z \approx 0.33$ нТл і $\bar{B}_z \approx 1.1$ нТл. Порівняння зі значеннями геомагнітного індексу A_p дозволяє стверджувати, що геомагнітні збурення виникали при негативних середньодобових значеннях B_z -компонента міжпланетного магнітного поля. Разом з тим від'ємні миттєві значення B_z -компонента магнітного поля не завжди викликали збільшення індексу A_p .

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження доводять незамінність наземних радіоспостережень у випадках центрально-розташованих КВМ, які рухаються в напрямку Землі і можуть не реєструватися космічними і наземними коронографами. Збільшення швидкості сонячного вітру в широкому діапазоні геліоширот, яке спостерігається радіоастрономічними методами, може свідчити про

високу ймовірність виникнення геомагнітного збурення, пов'язаного із проходженням даного високошвидкісного потоку. Радіоастрономічні спостереження в широкому діапазоні геліоширот поряд із спостереженнями *in situ* можуть бути використані для розробки методики прогнозування геомагнітних збурень.

Робота виконана при фінансовій підтримці «Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012 — 2016 рр.» в рамках проекту «Односторонні дослідження радіовипромінювання Сонця, збурень сонячного вітру та іоносфери Землі з допомогою української системи декаметрових радіотелескопів УРАН та космічних апаратів».

1. Брауде С. Я., Мень А. В., Содін Л. Г. Радиотелескоп декаметрового діапазона волн УТР-2 // Антенны. — М.: Связь, — 1978. — № 26. — С. 3—15.
2. Власов В. И., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Связь между вариациями индекса геомагнитной активности и параметров межпланетных мерцаний // Геомагнетизм и аэрономия. — 1985. — 25, № 2. — С. 254—258.
3. Доровский В. В., Мельник В. Н., Коноваленко А. А. и др. Свойства сложного всплеска II типа с богатой «ёлочной» структурой на частотах 3 — 33 МГц // Радиофизика и радиоастрономия. — 2013. — 18, № 2. — С. 107—117.
4. Ермолаев Ю. И., Ермолаев М. Ю. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофиз. процессы и биосфера. — 2009. — 8, № 1. — С. 5—35.
5. Калиниченко Н. Н., Фалькович И. С., Коноваленко Н. Н. и др. Корональный выброс массы 15 февраля 2011 года в межпланетном пространстве и его наблюдения методом мерцаний космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн // Радиофизика и радиоастрономия. — 2013. — 18, № 4. — С. 301—308.
6. Кременецкий И. О., Черемних О. К. Космічна погода. — Київ: Наук. думка, 2009. — 143 с.
7. Мень А. В., Шарыкин Н. К., Захаренко В. В. и др. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УРАН-2 // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — 8, № 4. — С. 345—356.
8. Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Калиниченко Н. Н. и др. Вариации параметров струйной структуры солнечного ветра на расстояниях более 1 а. е. в 2003—2004 гг. // Радиофизика и радиоастрономия. — 2006. — 11, № 1. — С. 31—41.

Стаття надійшла до редакції 15.12.14

Н. Н. Калиниченко¹, А. А. Коноваленко¹, Я. С. Яцків², Л. Н. Литвиненко¹, В. В. Доровський¹, А. И. Браженко³, М. Р. Оляк¹, О. А. Литвиненко¹, В. Н. Мельник¹

¹ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков

² Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

³ Гравиметрическая обсерватория Института геофизики Национальной академии наук Украины, Полтава

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА, ВОЗМУЩЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ, С ПОМОЩЬЮ УКРАИНСКОЙ СИСТЕМЫ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ УРАН И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Исследованы свойства коронального выброса массы, который двигался в сторону Земли и не был зарегистрирован космическими и наземными коронографами. Доказана незаменимость наземных радионаблюдений в случае центрально-расположенных КВМ. Исследована связь между скоростью солнечного ветра в широком диапазоне гелиоширот и возникновением геомагнитных возмущений. Показано, что увеличение скорости солнечного ветра в широком диапазоне гелиоширот, которое наблюдается радиоастрономическими методами, может свидетельствовать о высокой вероятности возникновения геомагнитного возмущения.

Ключевые слова: декаметровый диапазон, солнечные радиовсплески, солнечный ветер, ионосфера, мерцания

N. N. Kalinichenko¹, A. A. Konovalenko¹, Ya. S. Yatskiv², L. N. Litvinenko¹, V. V. Dorovskii¹, A. I. Brazhenko³, M. R. Olyak¹, O. A. Litvinenko¹, V. N. Melnik¹

¹ Radio Astronomy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

² Main Astronomy Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

³ Gravimetric Observatory of Geophysic Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Poltava

INVESTIGATIONS OF SOLAR RADIO EMISSION, SOLAR WIND AND IONOSPHERIC DISTURBANCES WITH USING UKRAINIAN DECAMETER RADIO TELESCOPE SYSTEM UРАН AND SPACECRAFTS

Properties of the coronal mass ejection, which moved toward Earth and was not registered by cosmic and ground based coronagraphs, were studied. It was proved irrepleaceableness of ground-based radio observations in the case of central placed CME. The connection between the solar wind in the wide band of heliolatitudes and appearance of geomagnetic storms was investigated. It was shown that the increase of the solar wind velocity in the wide-band of heliolatitudes, which is observed by radio astronomy methods, proves the high possibility of geomagnetic storm appearance in this case.

Key words: decameter range, solar radio bursts, solar wind, ionosphere, scintillations.