

УДК 551.501

В.И. ДРОБЖЕВ, В.В. ЛЯХОВ, А.Ф. ЯКОВЕЦ, О.Г. ГОНТАРЕВ

## ПРОГНОЗ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ РАДИОВСПЛЕСКОВ СОЛНЦА НА ДВУХ ЧАСТОТАХ

В ДГП «Институт ионосферы» РГП «Центр астрофизических исследований» МОН РК на полигоне «Орбита» введена в действие установка ТНА-57 (радиотелескоп с диаметром зеркала 12 м), позволяющая вести непрерывное наблюдение Солнца на двух частотах: 1 ГГц и 2,8 ГГц. В статье обосновывается возможность краткосрочного прогноза электромагнитных возмущений в околоземном пространстве – «магнитных бурь» на основе службы непрерывной регистрации радиоизлучения Солнца на этих двух частотах. Изложена методика реализации данной программы.

**Введение.** Прогнозированию космической погоды в настоящее время придается большое значение, особенно в технологически развитых странах, в связи с неблагоприятным воздействием случайных электромагнитных и корпускулярных потоков космического излучения на орбитальные комплексы объектов военного, технического и научного назначения. Влиянию неблагоприятной космической погоды подвержены также протяженные высоковольтные линии электропередач, кабельные линии и трубопроводы. Космическая погода определяется солнечной активностью, проявляющейся в оптическом, ультрафиолетовом, инфракрасном и радиодиапазонах, а также в корпускулярном (в основном, электроны и протоны) излучении. Прогностические параметры можно найти в каждом из этих диапазонов – только комплексный подход может приблизить к теоретическому и практическому изучению и возможному технологическому использованию Солнечно-Земных связей.

### Общие характеристики радиоизлучения Солнца

Радиоизлучение Солнца слагается из постоянной части, обусловленной тепловым излучением спокойного Солнца, испытывающим лишь немалые медленные изменения в течение цикла солнечной активности, и переменной части, излучаемой главным образом центрами солнечной активности. Переменная часть в свою очередь состоит из излучения теплового и нетеплового происхождения.

В сантиметровых и коротких дециметровых волнах усиление излучения Солнца состоит из кратковременных всплесков и медленно изменяющейся составляющей, которая имеет период, равный приблизительно периоду вращения

Солнца. Обе эти составляющие коррелируют с присутствием на диске Солнца центров активности и создаются тепловым излучением этих центров. Установлена тесная корреляция между солнечным радиоизлучением на волне  $\lambda=10,7$  см и суммарной видимой площадью пятен. Источники радиоизлучения на сантиметровых и коротких дециметровых волнах наблюдаются примерно на одной и той же высоте в атмосфере Солнца, равной по порядку величины 0,06–0,07 радиуса Солнца.

Нетепловое излучение Солнца обусловлено плазменным и синхротронным механизмами генерации волн и состоит из радиовсплесков I, II, III, IV и V типов.

По данным исследования [1] из 160 зарегистрированных микроволновых всплесков 70±8% оказались связанными с корональными выбросами.

В работе [2] исследуются вариации радиопотока на частоте 3 ГГц. В то время как поток радиоизлучения на частоте 3 ГГц от вспышки 7 апреля 1997 г. показал двухпиковую периодичность, запись потока от вспышки 29 марта 2001 г. выявила регулярные скачки потока на фазе подъема радиовсплеска. Данная интерпретация наблюдаемых явлений с использованием модели слияния токовых петель солнечных вспышек.

Всплески типа III могут происходить по одному через различные интервалы времени или группами на дециметровых и метровых волнах. Скорость смещения частот непрерывно убывает со временем, приблизительно по закону  $df/dt = -f/4,5 \text{ с}^{-1}$  [3]. Интерферометрические и оптические наблюдения показывают, что источники всплесков типа III движутся через корону вверх со средней скоростью 150000 км/с (пределы: от 60000 до 285000 км/с). Данные наблюдений позволяют предположить, что это излучение воз-

никает за счет периодических колебаний корональной плазмы. Спектры всплесков типа III иногда бывают сложными. Точные разрезы динамического спектра (временные профили) этих быстрых явлений невозможно получить по обычным медленным записям плотности потока, изучение их необходимо проводить с помощью быстро записывающих инструментов.

В работе [4] сообщается о результатах анализа наблюдений группы всплесков III типа, выполненных с помощью 2,6-3,8 ГГц спектрометра национальной обсерватории Китая. Отмечено, что радиовсплески имели широкую полосу частот ( $> 100$  МГц), очень короткую продолжительность ( $< 100$  мс), высокую степень поляризации (~100%) и большую скорость дрейфа по частоте ( $> 1$  ГГц/с), а также продемонстрировали быстрые пульсации с периодом 100-200 мс. Исходя из характеристик радиовсплесков, можно предположить, что эти всплески III типа обусловлены эмиссией на основной плазменной частоте.

Со всплесками типа III связаны так называемые всплески типа U. Их спектры имеют U-образную форму, т.е. частота всплеска вначале быстро убывает, а затем, пройдя точку поворота, вновь возрастает. Точка поворота чаще всего располагается между 100 и 150 МГц, а в некоторых случаях и на более высокой частоте. Большая часть таких всплесков происходит во время хромосферных вспышек и длится несколько секунд. Между всплесками типа III и типа U, как считают, нет существенных различий, кроме обращения в спектре, модули значения  $df/dt$  имеют один и тот же порядок величины. Обращение может обуславливаться движением агента, возбуждающего корональное вещество, вдоль петлеобразных магнитных силовых линий активных областей.

Теоретические представления о механизме генерации всплесков типа III сводятся к следующему. Поток электронов, генерированных в области хромосферной вспышки, движется вверх и вызывает продольные колебания корональной плазмы, которые превращаются затем в радиоволны. Наблюдения показывают, что длина волны излучения увеличивается со временем; это объясняется тем, что поток электронов движется вверх через корону в направлении убывания плотности и последовательно возбуждает все новые области. Число электронов, видимо, дос-

таточно для того, чтобы вызывать наблюдаемую интенсивность радиовсплесков типа III.

Выбросы типа II проявляются на монохроматических записях в виде внезапных сильных увеличений потока солнечного радиоизлучения. Поток может возрасти в тысячу раз (это зависит от длины волны) и оставаться повышенным в течение промежутка времени от нескольких минут до нескольких десятков минут и более.

Спектры всплесков типа II характеризуются смещением частот, для скорости смещения получено значение  $df/dt = -0,22$  МГц/с. Предполагается, что механизм образования всплесков типа II такой же как у всплесков типа III. Соответствующие скорости движения агента, вызывающего излучение, составляют 300 – 1000 км/с. Эта скорость отождествляется со скоростью потока плазмы, инжектированного солнечной вспышкой, достигающего орбиты Земли и вызывающего сильные магнитные бури. Авторы работы [5] предполагают, что в качестве возмущающего агента в механизме образования радиовсплесков II и III типов наряду с пучком энергичных электронов может выступать ударная волна.

В некоторых случаях всплески типа II сопровождаются повышением основного уровня на метровых волнах. Эти повышения названы всплесками типа IV, их основные характеристики сводятся к следующему.

а) Всплески типа IV происходят после хромосферной вспышки. Поток радиоизлучения возрастает в течение 20-40 мин, а ослабевает медленнее (1 час или несколько часов). Явной связи с баллом вспышки не установлено.

б) Существует тесная корреляция между всплесками типа IV и всплесками космических лучей. Можно утверждать, что вероятность появления всплеска космических лучей после хромосферной вспышки наиболее высока в тех случаях, когда вспышка имеет балл 3 или 3+, дает всплеск радиоизлучения типа IV с плотностью потока, большей  $5 \times 10^{-17}$  Вт/м<sup>2</sup>\*Гц, и расположена в западном полушарии Солнца.

Время запаздывания всплесков радиоизлучения типа IV по отношению к хромосферным вспышкам сравнимо с временем запаздывания частиц космических лучей, генерированных вспышкой и достигающих Земли через 15 – 90 мин после вспышки.

В работе [6] сообщается о наблюдениях радиовсплеска IV типа, сопровождаемого группой всплесков III типа с нормальным и обратным дрейфом по частоте, а также множества долгоживущих квазипериодических пульсаций, выполненных на радиоспектрометрах (1,0-2,0 и 2,6-3,8 ГГц) национальной астрономической обсерватории (Китай) 23 сентября 1998г. Делается вывод, что топология корональных магнитных полей содержит множество дискретных областей ускорения и инжекции электронов на различных высотах. Всплески типа V происходят в начальной фазе вспышки одновременно со всплесками типа III или вскоре после них и продолжаются 0,5 – 3 мин.

### **Воздействие на околоземное пространство электромагнитного и корпускулярного излучения хромосферных вспышек**

Хромосферные вспышки характеризуются усилением ультрафиолетового, рентгеновского и корпускулярного излучения Солнца. Ультрафиолетовое излучение оказывает воздействие в то время, когда вспышка наблюдается оптически. Влияние корпускулярного излучения оказывается тогда, когда частицы доходят до Земли.

Корпускулярный поток, генерированный солнечной вспышкой, достигая окрестности Земли, взаимодействует с магнитосферой и, деформируя её, вызывает геомагнитную бурю. Особенно сильное воздействие при этом оказывается на горизонтальную составляющую земного магнитного поля. Как правило, на начальной фазе магнитной бури напряженность горизонтальной составляющей резко (в течение 3-6 часов) возрастает (среднее отклонение составляет  $10 \gamma$ ), а затем падает (отклонение достигает  $-30 \gamma$ ) и после этого медленно, в течение 2-3 суток, возвращается к своему начальному состоянию [7], стр. 28.

Наблюдения показывают, что 80%, 30% и 20% хромосферных вспышек соответственно баллов 3+, 3 и 2, расположенных вблизи центра солнечного диска, сопровождаются геомагнитными бурями в течение промежутка времени, равного примерно 2 суткам. Средний промежуток времени между вспышкой и магнитной бурей равен 34 часам для вспышек балла 3 и 24 часам для самых сильных балла 3+. Наиболее короткий из зарегистрированных промежуток времени составлял 17 часов. Эти запаздывания соответствуют средним скоростям потока частиц 1200, 1900 и 2400 км/с соответственно.

Работа [8] содержит краткий исторический очерк электромагнитного мониторинга на ОНЧ крупномасштабных ионосферных возмущений, обусловленных вспышечной активностью Солнца, а также предполагаемых возмущений, связанных с активизацией очагов землетрясений в литосфере и мантии Земли, и рекомендации, ориентированные на повышение достоверности краткосрочного прогноза сейсмической активности.

Негативное воздействие космической погоды на земные технологические системы исследуется в работе [9]. В проводящих наземных системах (линиях электропередач, трубопроводах) возможно появление сильных наведенных токов, обусловленных вариациями геомагнитного поля во время больших магнитных бурь. В работе оценивается возможная величина эффекта для широт Алма-Аты, Новосибирска и Иркутска.

### **Выделение базовых параметров, необходимых для прогноза космической погоды в окрестности Земли**

Радиоизлучение на частотах 1ГГц и 2,8ГГц, представляет собой сумму теплового излучения спокойного Солнца и излучения солнечных центров активности, причем нетепловая составляющая центров активности создается преимущественно механизмами I, III и IV типов. При этом, параметры радиовсплеска III типа являются наиболее интересными с точки зрения прогнозирования вспышечного выброса облака плазмы.

Проведенный анализ показывает, что возможности приемного устройства (установка ТНА-57 на полигоне "Орбита", осуществляющая непрерывную регистрацию радиоизлучения Солнца на фиксированных частотах 1 ГГц и 2,8 ГГц) позволяют регистрировать и идентифицировать (определяя скорость дрейфа частоты) радиовсплески III типа. Поскольку всплески III типа происходят на начальной фазе солнечной хромосферной вспышки и имеют короткую длительность (до 20с), то информация о начале вспышки окажется в распоряжении специалистов через 7 мин после её начала (радиоволна проходит расстояние от Солнца до Земли за  $\sim 7$  мин). По интенсивности радиовсплеска и величине скорости дрейфа его частоты можно попытаться сделать прогностическую оценку балла вспышки и, тем самым, спрогнозировать время прихода к Земле потока плазмы, инжектированного из активной вспышечной области. Этот интервал времени,

как было выяснено, лежит в пределах от 17 час до 48 час. Поток плазмы, достигнув окрестности Земли, вызывает магнитосферную бурю и может привести к нежелательным последствиям для космической и даже наземной техники.

### О методике выделения радиовсплесков III типа при непрерывной регистрации сигнала на установке ТНА-57 в режиме реального времени.

Методику выделения радиовсплеска III типа можно построить, исходя из свойств его амплитудно-частотных характеристик.

#### Амплитудные характеристики.

Наблюдения радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см за несколько оборотов Солнца, выставленные в ИНТЕРНЕТЕ [11], свидетельствуют, что плотность потока излучения меняется в пределах ( $0,70 \cdot 10^{-20} - 1,10 \cdot 10^{-20}$ ) Вт/ $m^2 \cdot Гц$ . Где-то в этой полосе лежит среднее (фоновое) значение плотности потока излучения на длине волны 10,7 см. Как следует из приведенного выше рассмотрения, амплитуда всплесков II типа увеличивается по отношению к фону в 103 раз, IV типа – в 103 раз, V типа – в 102 раз. Примерно такого же увеличения амплитуды в 103 раз следует ожидать и для всплесков III типа.

#### Временные характеристики.

Всплески II типа делятся от нескольких минут до нескольких десятков минут, всплески V типа – от полуминуты до трех минут, время возрастаания всплесков IV типа составляет 20-40 минут, а время спада – несколько часов. Из сообщения [5] следует, в частности, что длительность всплеска III типа может составлять 0,1 с,

хотя многолетние измерения свидетельствуют, что продолжительность радиовсплеска может достигать 20 с. Отметим, что продолжительность радиовсплесков III типа наименьшая среди всех типов радиовсплесков.

Найдем некоторую среднюю продолжительность всплеска III типа. Импульс, дрейфуя по частоте, регистрируется установкой ТНА-57 дважды:

первый раз на частоте 2,8 ГГц, второй раз – на частоте 1 ГГц в том случае, если время между этими импульсами  $\Delta t$  больше времени самого импульса  $\tau$  (здесь  $\tau$  определяется разрешающей способностью радиотелескопа). Оценим эту величину  $\Delta t$  из следующих соображений. Скорость частотного дрейфа радиовсплесков III подчиняется эмпирическому закону

$$df/dt = -f/4,5 \text{ с}^{-1}.$$

Решение этого уравнения при дополнительных условиях

$$f(t=0) = 2,8 \text{ ГГц}, f(t = \Delta t) = 1 \text{ ГГц}$$

дает величину  $\Delta t = 5 \text{ с}$ .

Т.о., если  $\tau < \Delta t$ , установка ТНА-57 способна зарегистрировать радиовсплеск III типа в виде характерного дуплета импульсов на частотах 2,8 ГГц и 1 ГГц с характерным времененным интервалом между ними  $\Delta t \approx 5 \text{ с}$ .

#### Алгоритм выделения радиовсплеска III типа.

На основании рассмотренных временных и амплитудных характеристик радиоизлучения можно построить методику выделения радиовсплесков III типа в режиме непрерывного времени на основе следующего алгоритма (см. рис. 1).

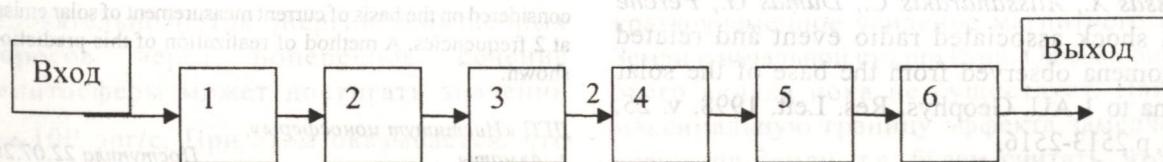


Рис.1. Блок-схема устройства, реализующего алгоритм выделения радиовсплеска III типа.

На вход подается цифровой сигнал с радиотелескопа, на выходе генерируется сообщение о факте прохождения радиовсплеска III типа.

- 1 – Блок определения фонового сигнала  $J_\phi$ .
- 2 – Блок определения амплитуды сигнала  $J_m$ .
- 3 – Блок определения отношения сигналов  $J_m/J_\phi$ .
- 4 – Блок определения длительности сигнала  $\tau$ .

5 – Блок определения интервала времени между сигналами  $\Delta t$ .

6 – Блок анализа выдает заключение о факте регистрации всплеска III типа, если

$$(J_m)_1/J_\phi \leq 103, \text{ и}$$

$$(J_m)_2/J_\phi \leq 103, \text{ и}$$

$$\tau_1 = (\varepsilon)c, \text{ и}$$

$$\tau_2 = (\varepsilon)c \quad , \quad \text{и}$$

$$0,1c \leq \Delta\tau \leq 20c$$

Здесь  $\varepsilon$  - разрешающая способность радиотелескопа.

## Заключение

Практическая реализация предложенной методики может привести к созданию дополнительного прогностического параметра по предсказанию космической погоды на основе анализа радиовсплесков III типа, выделенных из непрерывной регистрации радиоизлучения Солнца на частотах 2,8ГГц и 1ГГц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Dougherty B.L., Zirin H., Hsu K. Statistical correlations between solar microwave bursts and coronal mass ejections. Bull. Spec. Astrophys. Observ. 2001, v.51, p.457-463.
2. Karlicky M., Jiricka K. International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium 2003 "Solar Variability as an Input to the Earth's Environment", Tatranska Lomnica, 23-28 June, 2003.. Noordwijk: ESTEC. 2003, p. 499-502.
3. Де Ягер К. Строение и динамика атмосферы Солнца, Изд.-во иностранной литературы, М, 1962.
4. Wang M., Duan C., Xie R., Yan Y. Highly polarized type III microwave bursts on 15 April 1998. Sol. Phys. 2003. v.212, №2, p. 401-406.
5. Bougeret J., Zarka P., Caroubalos C., Karlinsky M., Leblanc Y., Maroulis A., Hillaris A., Moussas X., Alissandrakis C., Dumas G., Perche C. A shock associated radio event and related phenomena observed from the base of the solar corona to 1 AU. Geophys. Res. Lett. 1998. v. 25, №14, p.2513-2516.
6. Wang M., Duan C., Xie R., Yan Y., Sych R., Altynsev A. A type IV radio burst associated with type III burst, pulsation and spike emissions. Sol. Phys. 2003. v.212, №2, p. 407-412.

7. Шабанский В.П. Явления в околоземном пространстве, Наука, М., 1972.

8. Вербин Ю.П., Жолнеров В.С., Бисярин М.А., Зарх А.З., Писарев С.Б., Соколов В.Е. Электромагнитный мониторинг ионосферных возмущений, обусловленных вспышечной активностью Солнца и активизацией очагов землетрясений в литосфере и мантии Земли. Радиотехника (Москва). 1999. №11, стр. 74-77.

9. Водяников В.В., Гордиенко Г.И., Нечаев С.А., Соколова О.И., Хомутов С.Ю., Яковец А.Ф. Наведенные токи в линиях электропередач по данным вариаций геомагнитных вариаций. Геомагнетизм и аэрономия, 2006, т. 46, № 6, с. 853-858.

10. Акасофа С., Чепмен С. Солнечно-земная физика, часть 2, Мир, М., 1975.

11. <http://www.nwra-az.com/spawx/f10.html>

## Резюме

КР БФМ «Астрофизикалық зерттеулер орталығы» РМК «Ионосфера институты» МЕК «Орбита» полигонында ТНА-57 қондырғысы (айнасының диаметрі 12 м радиотелескоп) іске қосылған, ол Күнді екі: 1 ГГц және 2,8ГГц жиіліктерде үзіліссіз бақылауға мүмкіндік береді. Мақалада Күннің көрсетілген екі жиіліктері радиосөule шығаруын үзіліссіз тіркеу қызметі негізінде жер маңы кеңістігінде болатын электромагниттік үйіткулардың – «магниттік дауылдардың» қысқамерзімдік болжамының мүмкіндігі тұжырымдалған. Осы бағдарламаның жүзеге асырылу өдіstemесі баяндалған.

## Summary

A radiotelescope with the reflector of 12m at frequencies 1 GHz and 3 GHz is mounted for observing a solar radio emission. A possibility of short term prediction of the space weather is considered on the basis of current measurement of solar emission at 2 frequencies. A method of realization of this prediction is shown.

ДГП «Институт ионосферы»,  
г. Алматы

Поступила 22.07.2007