

РАДИОГЕЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ВСПЫШЕЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

²Г.Я. Смольков, ²А.М. Уралов, ¹И.А. Бакунина

RADIO-HELIOGRAPHIC DIAGNOSTICS OF POTENTIAL FLARE PRODUCTIVITY OF ACTIVE REGIONS

G.Ya. Smolkov, A.M. Uralov, I.A. Bakunina

За 1–2 дня до мощной вспышки по данным с высоким пространственным разрешением радиогелиографов Сибирского солнечного радиотелескопа (ССРТ, 5.7 ГГц) и радиогелиографа Нобеяма (NoRH, 17 ГГц) наблюдаются смещения центров радиояркости в распределении параметра Стокса *I* по отношению к распределению параметра *V*. Показано, что это может быть связано с поведением квазистационарных источников над линией инверсии радиальной составляющей магнитного поля – neutral line associated sources (NLS), – имеющих яркостную температуру до 10^6 К и круговую поляризацию до 90 %. Рождение NLS сопряжено с выходом нового магнитного потока в атмосферу активной области (АО) – классическим фактором вспышечной активности. Поэтому NLS являются предвестником мощных солнечных вспышек и их можно использовать как фактор прогноза. Высокое разрешение ССРТ позволило установить в качестве признака предвспышечного состояния АО отклонение наблюдаемого распределения поляризации ее микроволнового излучения от «нормального» в той зоне солнечного диска, где находится активная область. Это привело к модификации критерия Танака–Эноме по наблюдениям на одной частоте. Использование данных двух радиогелиографов (ССРТ и NoRH) позволило предложить более эффективный способ краткосрочного прогноза солнечных вспышек – двухчастотный критерий нормальных долготных зон. Предвспышечные признаки, связанные со смещением центров яркости в *I* и *V* – трансформацией NLS в пятенные источники, – являются «тонкими» признаками, дополняющими прогнозирование согласно двухчастотному критерию, как показано на примере АО 10930, давшей мощные протонные вспышки 6 и 13 декабря 2006 г.

As deduced from the data with high spatial resolution obtained at radio heliographs of the Siberian Solar Radio Telescope (SSRT, 5.7 GHz) and the Nobeyama radioheliograph (NoRH, 17 GHz), displacements of radio brightness centers in distribution of the Stokes parameter *I* relative to that of the parameter *V* can be registered 1–2 days before an energetic flare. As shown, this phenomenon may be related to the behaviour of quasi-stationary sources over the inversion line of the radial magnetic-field component (neutral-line associated sources (NLS)). These sources have a brightness temperature up to 10^6 K and a circular polarization up to 90 %. NLS formation is associated with an outflow of a new magnetic flux into the atmosphere of an active region (AR) that is a classical factor of the flare activity. Therefore, the NLS is a predictor of energetic solar flares and can be used as a forecast factor. SSRT high resolution made it possible to establish, as a predictor of AR preflare state, a deviation of the observable distribution of AR microwave radiation polarization from the normal one within the Sun's disk area with an active region. This resulted in modification of Tanaka–Enome criterion as observed at a certain frequency. Using the data from two radio heliographs (SSRT and NoRH) allowed us to suggest more effective for short-term forecast of solar flares, namely, two-frequency criterion of normal longitudinal zones. Preflare features associated with the displacement of brightness centers in *I* and *V*, namely, with NLS transformation into spot sources, are fine traces added to forecast according to two-frequency criterion. This is illustrated by example of AR 10930 which produced energetic proton flares on December 6 and 13, 2006.

Введение

Радиогелиографы с высоким разрешением в микроволновом диапазоне позволили проводить регистрацию и изучение тонкой структуры АО, выделение областей накопления и первичного энерговыделения [1]. При анализе структуры короны АО, производящих мощные рентгеновские вспышки и выбросы корональной массы (КВМ), по данным ССРТ и NoRH выделены квазистационарные источники над линией инверсии радиальной составляющей магнитного поля – neutral line associated sources (NLS) – с яркостной температурой до 10^6 К и круговой поляризацией до 90 % [2]. Рождение NLS сопряжено с выходом нового магнитного потока в атмосферу АО – классическим фактором вспышечной активности. Поэтому NLS являются предвестником мощных солнечных вспышек, и их можно использовать как фактор прогноза. Физическая связь NLS с местами энерговыделения в короне АО подтверждена экспериментально. Излучение квазистационарного NLS сосредоточено в основаниях и вершине магнитной петли, соединяющей, например, два сближающихся солнечных пятна. Микроволновое излучение мощных рентгеновских вспышек стартует из этой петли. Механизм излуче-

ния NLS по наблюдениям на одной частоте однозначно пока еще не установлен.

Высокое разрешение ССРТ позволило установить в качестве признака предвспышечного состояния АО отклонение наблюдаемого распределения поляризации ее микроволнового излучения от «нормального» в той зоне солнечного диска, где находится активная область. Это привело к модификации критерия Танака–Эноме по наблюдениям на одной частоте [3]. По наблюдениям на двух радиогелиографах (ССРТ и NoRH) предложен способ краткосрочного прогноза солнечных вспышек – двухчастотный критерий нормальных долготных зон. Критерий при использовании таблиц сопряженности и коэффициента успешности при прогнозировании уровня вспышечной активности АО выше M1.0 показал лучшую эффективность по сравнению с одночастотным способом и способом прогнозирования по поляризационному признаку критерия Танака–Эноме и [4–6].

Двухчастотный способ показывает (рис. 1 а, б), где на диске Солнца схематически изображены зоны нормального (не вспышечноопасного) распределения круговой поляризации излучения на 5.7 ГГц (ССРТ) и 17 ГГц (NoRH). Вид нормального (изобра-

жено одномерным) распределения поляризации по АО в каждой зоне определяется «геометрическим» эффектом – сменой знака круговой поляризации [7].

В данной работе показано успешное применение двухчастотного способа прогноза для протонной АО 10930, в которой наблюдался долгоживущий NLS [8].

Прогнозирование вспышечной активности АО 10930 NOAA

Активная область АО 10930 NOAA наблюдалась в трех оборотах в ноябре 2006 – январе 2007 г. Во втором обороте (ПЦМ (прохождение центрального меридиана): 2006 12. 11) она произвела две протонные вспышки, причем, вспышка X6.5 6 декабря 2006 г. (на Е-лимбе и в эпоху минимума солнечной активности!) привела к нарушению работы GPS в высокоточном режиме позиционирования на всей освещенной стороне Земли на протяжении более 10 мин [9].

Распределение поляризации, наблюдавшееся 5 декабря, за сутки до протонной вспышки, приведено на рис. 2 на обеих частотах наблюдений на ССРТ (справа) и NoRH (слева).

С 8 по 12 декабря вспышки в АО 10930 практически отсутствуют. В это время наблюдается долгоживущий NLS, положение которого определено согласно пересчету магнитного поля по коду Руденко в корону АО [2] и представлено на рис. 3.

11–12 декабря перед протонной вспышкой центры яркости в интенсивности начинают смещаться по отношению к центрам яркости в поляризации, а NLS смещается с нейтральной линии магнитного поля в сторону главного пятна южной полярности, т. е. трансформируется в пятенный источник, которым становится окончательно 14 декабря – в последний вспышечно-активный день АО 10930. На рис. 4 можно видеть смещения центров радиояркости на обеих частотах. Прогнозирование согласно двухчастотному критерию дает успешный результат («да-да»).

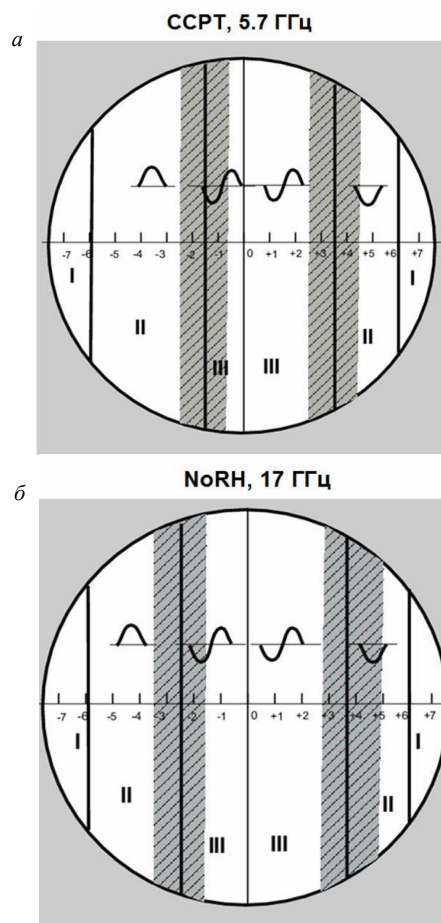


Рис. 1. Долготные зоны нормального распределения поляризации для 5.7 ГГц (а) и 17 ГГц (б). Штриховкой показаны переходные дни от одной зоны к другой, связанные с неопределенностью установления нормального распределения поляризации (конец инверсии хвостового пятна в восточном полушарии Солнца и головного пятна в западном). Вверху над осью – нормальное распределение поляризации в каждой зоне (в зоне I нормальным считается отсутствие поляризации).

AR 10930

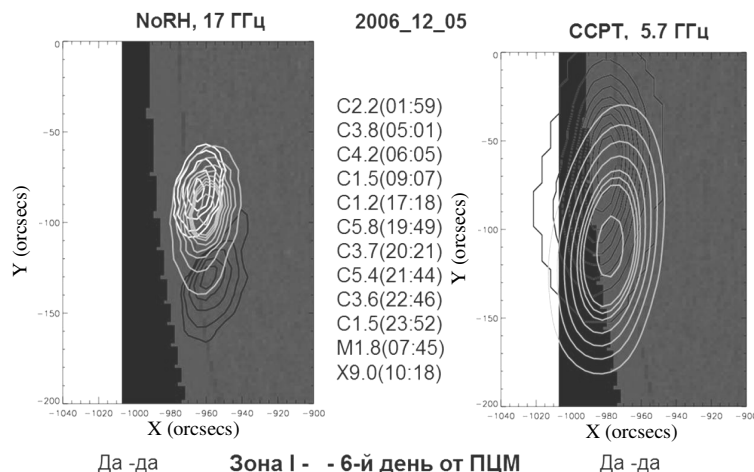


Рис. 2. Распределение поляризации anomalно на обеих частотах в прилибмовой зоне I, что позволяет в этот и в последующие дни уверенно прогнозировать мощные вспышки. Поляризация – контуры 0.3; 0.5; 0.7; 0.9 от максимального (минимального) значения $T(V)$; области излучения с избытком поляризации правого знака (R–L) показаны контурами черного цвета. Интенсивность – контуры 0.3; 0.5; 0.7; 0.9 от максимального значения $T(I)$ – светлые контуры. «Да-да» – успешный результат прогнозирования.

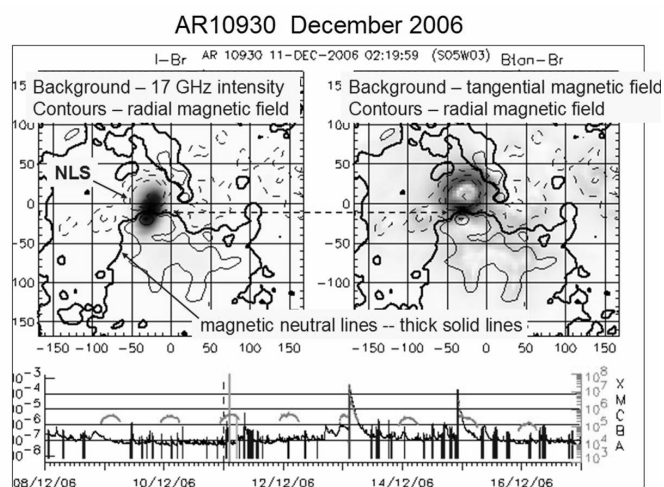


Рис. 3. NLS на 17 ГГц в АО 10930 11 декабря 2006 г. Слева в полутонах – интенсивность, толстые сплошные линии – нейтральная линия радиальной составляющей магнитного поля; справа в полутонах – тангенциальная составляющая магнитного поля, контуры – радиальное магнитное поле; внизу – изменение потока мягкого рентгена по данным GOES (<http://www.sec.noaa.gov/today.html>).

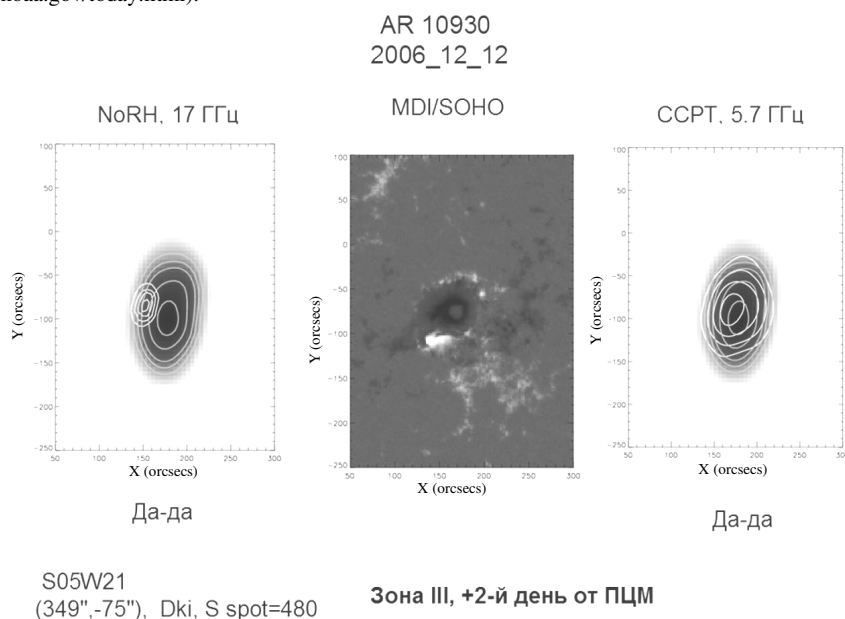


Рис. 4. Слева – смещение центра радиояркости V по отношению к I на 17 ГГц, справа – на 5.7 ГГц. В центре – магнитограмма SOHO/MDI. «Да-да» – успешный результат прогнозирования.

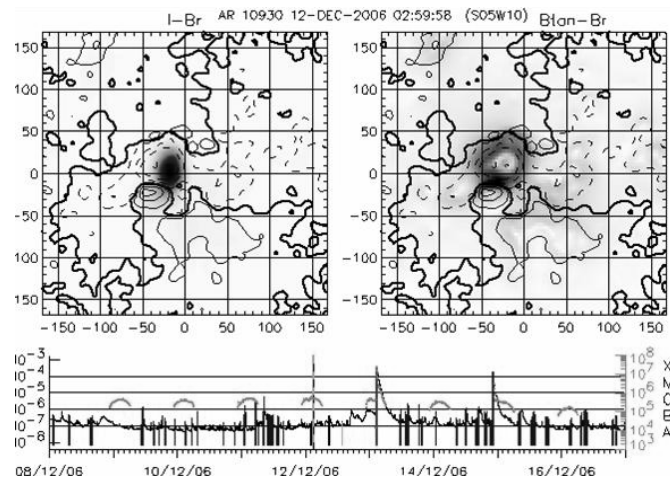


Рис. 5. То же, что на рис. 3 для 12 декабря 2006 г.

Из рис. 5 видно, что NLS в этот день смещается в сторону «старого» пятна. В этот и в последующие дни он становится неотличим от пятенного источника. Смещение наблюдается за сутки до протонной вспышки.

Выводы

В данной работе на примере протонной АО 10930 показано следующее.

1. Возможно успешное прогнозирование мощных вспышек благодаря новому способу – двухчастотному критерию «нормальных» долготных зон.

2. Связь NLS со смещением центров радиояркости в интенсивности и поляризации перед мощными вспышками – перед протонной вспышкой 13 декабря 2006 г. X3.4 (02:14 UT) NLS смещается с нейтральной линии и становится неотличим от обычного пятенного источника по своим пространственным характеристикам.

Обнаруженные с высоким пространственным разрешением «тонкие» признаки предвспышечной ситуации вместе с двухчастотным способом прогноза по поляризационному признаку могут служить основой для создания метода успешного прогноза мощных солнечных вспышек с использованием данных двух современных радиогелиографов.

Работы поддержаны Сибирским отделением РАН; Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 30 «Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля»; Минобрнауки РФ (ФНТП «Астрономия», «Уникальные установки»: № 01-27 – ССРТ, НИИ: 00-15-96710/НИИ-477.2003.2/РИ-112/001/0-45); РФФИ (04-02-31012, 04-02-39003, 05-07-31000, 05-07-90147, 05-07-90209; 06-02-16295, 06-02-39029, 07-02-01-066); РФФИ-ГФЕН, Росгидрометом, INTAS, INTAS-RFBR, ESO C&EE Programme, ISF, SCOSTEP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смольков Г.Я., Алтынцев А.Т., Гречнев В.В. и др. Микроволновая диагностика и прогноз геоэффективных проявлений солнечной активности // Труды Всероссийской конференции «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности». Троицк, 2006. С. 293–303.

2. Uralov A.M., Rudenko G.V., Rudenko I.G. 17 GHz neutral line associated sources: birth, motion, and projection effect // Publications of the Astronomical Society of Japan. 2006. V. 58, N 1. P. 21–28.

3. Уралов А.М., Руденко Г.В., Руденко И.Г. Микроволновые источники над нейтральной линией: рождение, связь со вспышками и проекционный эффект // Известия РАН. Серия физическая. 2006. Т. 70, № 10. С. 1475–1477.

4. Максимов В.П., Бакунина И.А., Нефедьев В.П., Смольков Г.Я. Способ краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек / Патент № 2114449 от 27.06.1998 г. // Бюллетень изобретений. 1996. № 216. С. 131–134.

5. Бакунина И.А. Исследование возможностей краткосрочного прогноза солнечных вспышек на основе двухчастотного критерия «нормальных» долготных зон // Труды Всероссийской конференции «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности». САО РАН, п. Нижний Архыз, КЧР, 28 сентября – 2 октября 2006. С. 340–369

6. Бакунина И.А., Смольков Г.Я., Снегирев С.Д. Радиогелиографический двухчастотный метод прогнозирования солнечных вспышек по микроволновому излучению // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2007. Казань, 2007. Изд-во Казанского государственного университета, 2007.

7. Бакунина И.А. Двухчастотный метод краткосрочного прогноза солнечных вспышек // Труды XI Пулковской международной конференции по физике Солнца «Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений». Санкт-Петербург, 2007. С. 19–22.

8. Железняков В.В., Злотник Е.Я. О поляризации радиоволн, прошедших через область поперечного магнитного поля в солнечной короне // Астрон. журнал, 1963. Т. 40. С. 633.

9. Smolkov G.Ya., Uralov A.M., Bakunina I.A. Radioheliographical diagnostics of potential flare productivity of active regions // IHY2007-NISTP. Abstracts, Troitsk: IZMIRAN. 2007. P. 116–117.

10. Афраимович Э.Л., Жеребцов Г.А., Смольков Г.Я. Тотальный сбой спутниковой навигационной системы GPS во время солнечной вспышки 6 декабря 2006 г. // Доклады РАН. 2007. Т. 416, № 6. С. 1–5.

¹ФГНУ «Научно-исследовательский радиофизический институт» Роснауки, Нижний Новгород

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск