

УДК 523.985-125; 523.985.7-77

**РАДИОИСТОЧНИК НАД НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ, ПРОИЗВОДЯЩИХ ВСПЫШКИ КЛАССА X
(1998–2006 гг.; 17 ГГц; МЕТОД РАСЧЕТНЫХ МАГНИТОГРАММ; MOVIE)**

И.Г. Руденко, Г.В. Руденко, А.М. Уралов

**MICROWAVE SOURCE ABOVE A NEUTRAL LINE IN ACTIVE REGIONS PRODUCING X-FLARES
(1998-2006; 17 GHz; THE METHOD OF CALCULATING MAGNETOGRAMS; MOVIE)**

I.G. Rudenko, G.V. Rudenko, A.M. Uralov

Проведен поиск квазистационарных микроволновых источников над нейтральной линией (neutral line associated sources – NLS) на частоте 17 ГГц в восьми активных областях, связанных со вспышечными событиями балла X большой продолжительности (X-LDE) периода 1998–2006 гг. NLS идентифицируются по их расположению вблизи нейтральной линии вертикальной составляющей магнитного поля, где горизонтальная составляющая имеет абсолютный или локальный максимум. Такая связь с магнитной структурой отражает особенность NLS как источников, излучение которых сосредоточено либо в вершине магнитной петли, либо в ее основаниях, расположенных близко к нейтральной линии. Анализ показал, что событиям X-LDE указанного периода предшествовало заблаговременное появление одного или нескольких радиоисточников, проявляющих большую часть времени четкие признаки NLS. Это говорит в пользу NLS как фактора прогноза сильных вспышек.

We have searched for quasi-stationary microwave Neutral Line associated Sources (NLS) at a frequency of 17 GHz in eight active regions related to long-duration X class flare events (X-LDE) during 1998–2006. We identify NLS from their position nearby the neutral line of the vertical component of the magnetic field, where its horizontal component has its absolute or local maximum. This relation with magnetic structure reflects feature of NLS as sources which emission is concentrated either in top of a magnetic loop or in its footpoints located close to a neutral line. Our analysis has shown that X-LDEs of the specified interval were preceded by the appearance of one or more radio sources, which most part of time manifested distinct attributes of a NLS. This indicates importance of a NLS as a precursor of power flares.

1. Введение

Целью настоящей работы является выделение в микроволновом излучении солнечных активных областей (АО) признака, который мог бы использоваться для прогноза рентгеновских вспышек балла X большой продолжительности (X-LDE). К такому признаку следует отнести квазистационарные микроволновые источники, носящие название источников над нейтральной линией, neutral line associated sources – NLS. Интерес представляют NLS, дающие заметное излучение на частоте 17 ГГц – частоте, на которой ведутся регулярные наблюдения на радиогелиографе обсерватории Нобейма (NoRH). Единичный случай подробного анализа АО, содержащей такие источники, содержится в работе [1]. Позже нами было показано, что 17 ГГц NLS являются не уникальными, а типичными и часто доминирующими источниками в активных областях, производящих мощные рентгеновские вспышки X-LDE и корональные выбросы массы. Такой вывод явился следствием предварительного анализа трех активных областей вспышечного периода октябрь–ноябрь 2003 г. и представлен в работе [2], где впервые был предложен и опробован метод идентификации NLS, основанный на технике экстраполяции магнитного поля. Этот метод мы используем и в настоящем исследовании. NLS идентифицируются по их расположению на нейтральной линии или вблизи нее на магнитограмме вертикальной составляющей коронального магнитного поля в том месте, где горизонтальная составляющая имеет абсолютный или локальный максимум. Это весьма интересное, новое и важное обстоятельство. Для 17 ГГц NLS подходящая высота расчетных магнитограмм составляет 2–4 тыс. км над фотосферой. Радиоисточники над пятнами располагаются в максимумах вертикальной составляющей поля, что не явля-

ется секретом. Однако на практике многие 17 ГГц NLS воспринимаются как пятенные источники, а пятенные могут выглядеть как NLS. Это связано как с проекционным эффектом, присущим продольным магнитограммам, так и с часто встречаемым сходством визуальных характеристик (интенсивность, поляризация) этих источников. Это же является причиной, мешающей обнаружению и изучению NLS. В частности, до обнаружения нами 17 ГГц NLS их присутствие на радиокартах, полученных на радиогелиографе Нобеймы, оставалось незамеченным.

Что касается природы NLS, то до последнего времени она оставалась неразгаданной. Одной из причин этого было отсутствие метода корректной идентификации этих источников, поскольку точное знание периодов их явного присутствия в АО необходимо для детального отбора экспериментального материала с целью изучения NLS. Таким способом была отобрана АО 10488 упомянутого выше вспышечного периода октябрь–ноябрь 2003 г. Анализ интервалов многодневной эволюции АО на частотах 17 и 34 ГГц с дискретом 1 мин, 10 с и 1 с выявил физическую связь NLS с местами энергосвечения в короне активной области, что следовало ранее лишь из наблюдательных указаний на связь NLS с большими вспышками и теоретических рассуждений. Значимым результатом явилось обнаружение предвспышечного вертикального токового слоя. Установлено, что излучение квазистационарного NLS на 17 ГГц сосредоточено в основаниях и вершине магнитной петли – петли NLS, соединяющей два сближающихся солнечных пятна. Вершина петли NLS расположена под токовым слоем. Обоснование этих результатов и информацию о соотношении NLS и «пекулярных» источников можно найти в статье [3].

В настоящем исследовании мы расширяем статистику присутствия 17 ГГц NLS в активных областях, производящих вспышки балла X большой продолжительности. Проанализированы восемь активных областей периода 1998–2006 г. Анализ основан на графическом сопоставлении микроволновых изображений с расчетными магнитограммами коронального магнитного поля во все дни нахождения АО на солнечном диске.

2. Элементы анализа

2.1. Расчеты магнитного поля

Необходимость использования расчетного поля для цели идентификации NLS вызвана прежде всего тем, что доступное для измерений исходное продольное магнитное поле (поле по лучу зрения) в общем случае не позволяет правильно определить местоположение нейтральной линии радиальной магнитной составляющей (линии ее нулевых значений). В силу проекционного отличия между продольной и радиальной компонентами, их нейтральные линии близки по расположению только в довольно ограниченной области – вблизи центра солнечного диска. Это отличие может привести к ошибочному определению типа радиоисточника. Поскольку излучение NLS сосредоточено в магнитной петле, идентификация таких радиоисточников по нейтральной линии радиального поля более обоснована. В принципе, существует возможность вычисления радиального поля по векторным магнитограммам, но в силу известного существенного отличия в ошибках измерений продольной и поперечной составляющих использование векторных данных для наших исследований вряд ли обосновано. Кроме того, пока не существует регулярных векторных данных, представляемых с достаточно малым временным интервалом. Получение информации о полном магнитном векторе возможно на основе экстраполяции поля в потенциальном приближении. Использование такого упрощенного приближения может служить поводом для умеренного скептицизма в правомерности его использования в АО, присутствие в которых существенной непотенциальной составляющей не вызывает сомнений. Однако то, что такой подход, тем не менее, вполне оправдан, хорошо подтверждается практическими результатами. Конкретная реализация расчета (экстраполяции) магнитного поля в нашем анализе основана на гармоническом разложении [4], определяемого его условиями на граничной поверхности, учитывающим локальные изменения направления луча зрения по отношению к поверхности наблюдения. По найденным коэффициентам разложения на выбранной высоте вычислялись требуемые расчетные данные продольного и тангенциального магнитного поля.

2.2. Используемые данные и критерии их отбора

Для сопоставления магнитной структуры активных областей с их радиоизлучением использовались 96-минутные продольные магнитограммы SOHO-MDI полного диска (<http://soi.stanford.edu/magnetic/mag/>) и 10-минутные данные интенсивности 17 ГГц радиоизлучения полного диска NoRH (<http://solar.pro.nao.ac.jp/norh/images/10min/>) с 1998–2006 гг. Предварительно для последующего анализа был осуществлен отбор областей по данным рентгеновских вспышек (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR/_DATASOLAR/_FLARES/XRAY/_FLARES/) В рассмотрение включались только активные области, давшие продолжительные X-вспышки во время их прохождения по диску. В виду того, что нас главным образом интересовала предыстория вспышки, АО, которые не порождали подходящие события на достаточном удалении от восточного лимба, исключались из анализа.

pro.nao.ac.jp/norh/images/10min/) с 1998–2006 гг. Предварительно для последующего анализа был осуществлен отбор областей по данным рентгеновских вспышек (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR/_DATASOLAR/_FLARES/XRAY/_FLARES/) В рассмотрение включались только активные области, давшие продолжительные X-вспышки во время их прохождения по диску. В виду того, что нас главным образом интересовала предыстория вспышки, АО, которые не порождали подходящие события на достаточном удалении от восточного лимба, исключались из анализа.

2.3. Отображения расчетной магнитной структуры и интенсивности микроволнового излучения

Для каждой из отобранных АО подготавливались магнитные и радиоданные, отвечающие временному интервалу прохождения АО по солнечному диску. За каждой АО закреплялся определенный участок солнечной поверхности, не зависящий от ее положения на диске и используемый впоследствии для вывода микроволнового изображения и экстраполяции радиальной и тангенциальной компонент магнитного поля, соответствующих моментам наблюдений на 17 ГГц. Поскольку моменты 96-минутных магнитных измерений не совпадают с моментами радиоизображений и более существенно разрежены по времени, выбор конкретной магнитограммы определяется ее наибольшей близостью к моменту текущего радиоизображения. Приведение магнитной структуры и радиоизображения к одному и тому же независимому от положения АО на солнечном диске участку поверхности позволяет наилучшим образом выделить внутреннюю динамику АО. Продукт окончательной обработки представляется в виде снимка, фиксирующего моментальную магнитную структуру области и ее микроволновое изображение (рис. 1). Снимок содержит три графических фрагмента. На двух верхних фрагментах по-прежнему выведены яркостная температура микроволнового излучения (слева) и расчетное тангенциальное поле (справа) с наложенными на них контурами расчетного радиального поля. Нижний графический фрагмент отображает динамику полного рентгеновского потока во время прохождения по диску рассматриваемой АО; жирные вертикальные линии отмечают события, относящиеся к АО. Пример на рис. 1 демонстрирует случай двух радиоисточников с четко выделенными их типовыми признаками. Правый источник идентифицируется как пятенный – располагается над центром положительного магнитного пятна. Левый источник лежит над нейтральной линией (жирный контур) и привязан к локализации интенсивного тангенциального поля – NLS. На этом же кадре следует обратить внимание на появление слабого NLS справа от пятенного источника, локализация которого тесно примыкает к нейтральной линии и другому локальному максимуму тангенциального поля. В процессе дальнейшей эволюции магнитной области вплоть до X-вспышки 26.10.2003 этот NLS станет доминирующим источником в АО и, по-видимому, именно он будет отражать подготовительную фазу вспышки (см. рис. 4).

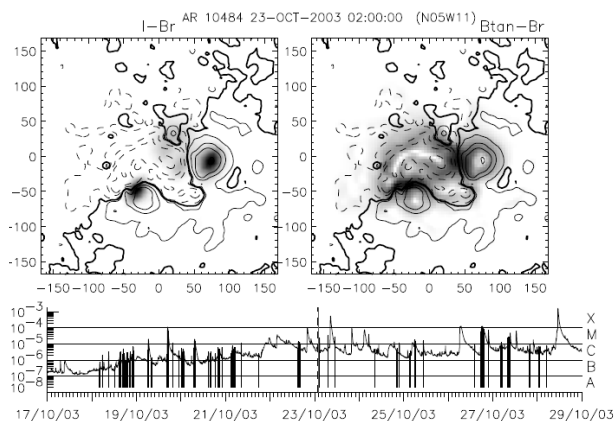


Рис. 1. Пример графического отображения микроволновой и магнитной структур активной области с двумя радиоисточниками пятенного и NLS-типа. На тоновые изображения радиоинтенсивности (справа) и тангенциального поля (слева) наложены контуры радиальной поля. Сплошные контуры соответствуют положительной полярности, пунктирные – отрицательной, жирные – нейтральной (нулевой) линии поля. Внизу представлен полный рентгеновский поток к периоду прохождения области по диску. Вертикальные столбики дают информацию о началах событий, относящихся к рассматриваемой области. Два удлиненных вертикальных отрезка отмечают момент радионаблюдения (сплошная линия) и момент измерения используемой для расчетов магнитограммы (пунктиром). В заголовке дополнительно отражаются: номер области, дата-время момента изображения и координаты центра изображаемого фрагмента солнечной поверхности.

Наблюдение за максимумами тангенциальной компоненты на нейтральной линии радиального поля концентрирует наше внимание на наиболее вероятных местах появления NLS и позволяет фиксировать их уже на стадии зарождения.

3. Результаты анализа

Для исследуемого периода 1998–2005 гг. было отобрано 8 активных областей в соответствии с нашими критериями отбора. Эволюция микроволновых изображений и магнитной структуры каждой АО представлялась сериями снимков (фильмами), соответствующими периодам прохождения АО по солнечному диску. Анализ этих областей, давших одно X-LDE событие или более, однозначно выявил появление перед событиями одного или нескольких радиоисточников, идентифицируемых как NLS (см. табл. и рис. 2–9). Появление NLS имело место в интервале времени от 5 до 1 сут до наступления события.

Существует корреляция между появлением NLS и моментами качественных изменений магнитной структуры, сопровождающихся появлением, ростом, движением нового магнитного потока или внедрением магнитного потока одного знака в область потока противоположного знака (интрузия). Также иногда отмечаются трансформации NLS в радиоисточники пятенного типа (перемещение максимума интенсивности излучения квазистационарного NLS из вершины петли NLS в ее подножие) и наоборот.

Идентифицированные 17 ГГц NLS в активных областях с X-LDE-событиями

Активные области	Кол-во NLS	Кол-во X-LDE
9026 (5 Jun 2000–7 Jun 2000)	1	1
9077 (12 Jul 2000–15 Jul 2000)	1	1
9415 (3 Apr 2001–15 Apr 2001)	1	5
9591 (23 Aug 2001–26 Aug 2001)	1	1
9661 (12 Oct 2001–20 Oct 2001)	1	1
9672 (22 Oct 2001–26 Oct 2001)	1	2
10017 (30 Jun 2002–04 Jul 2002)	1	1
10314 (17 Mar 2002–19 Mar 2002)	1	1
10365 (27 May 2003–31 May 2003)	1	1
10484 (18 Oct 2003–28 Oct 2003)	2	2
10486 (22 Oct 2003–3 Nov 2003)	3	4
10488 (30 Oct 2003–3 Nov 2003)	1	2
10696 (2 Nov 2004–10 Nov 2004)	2	2
10720 (11 Jan 2005–21 Jan 2005)	1	4
10808 (9 Sep 2005–18 Sep 2005)	1	4
10930 (12 Dec 2006–16 Dec 2006)	1	1

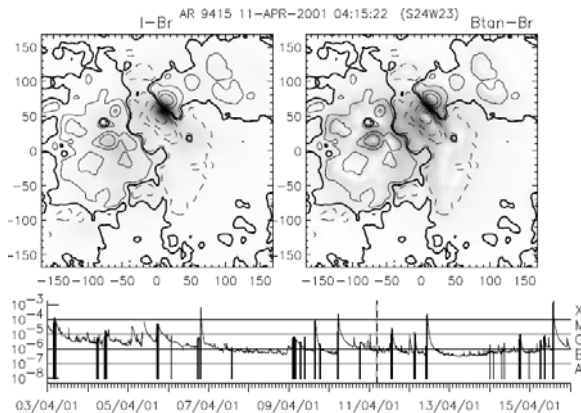


Рис. 2. АО 9415. NLS.

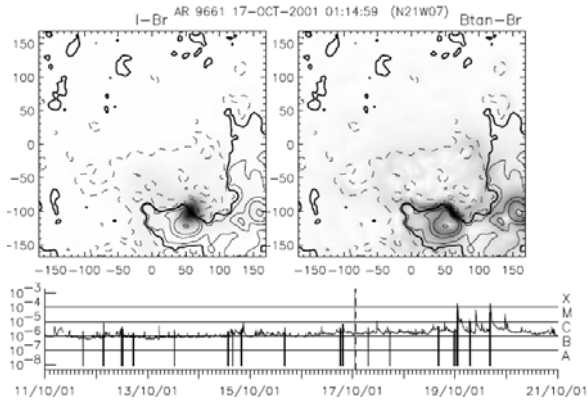


Рис. 3. АО 9661. NLS.

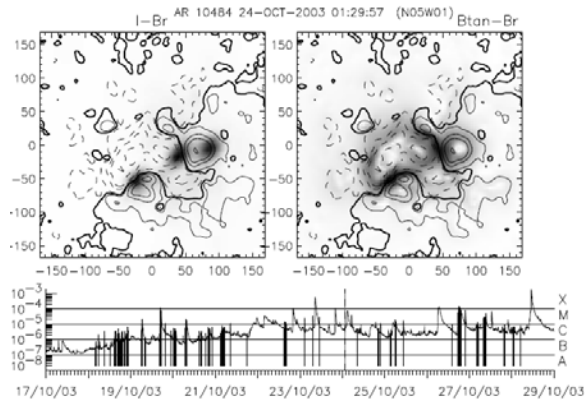


Рис. 4. АО 10484. Один пятенный источник, два NLS.

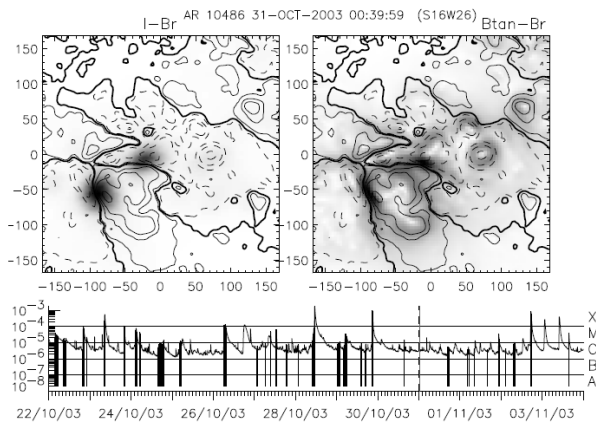


Рис. 5. АО 10486. Два NLS.

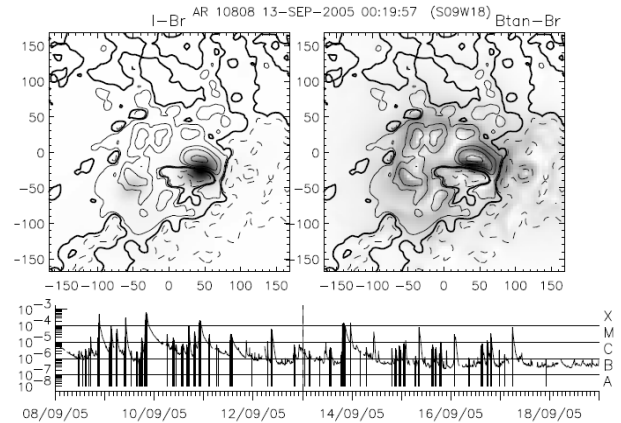


Рис. 9. АО 10808. Один NLS.

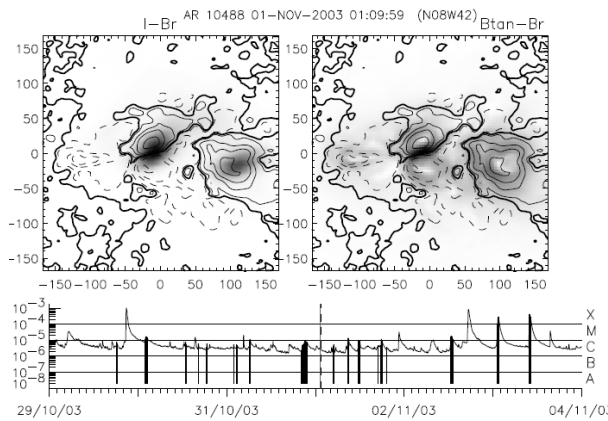


Рис. 6. АО 10488. Один пятенный источник и один NLS.

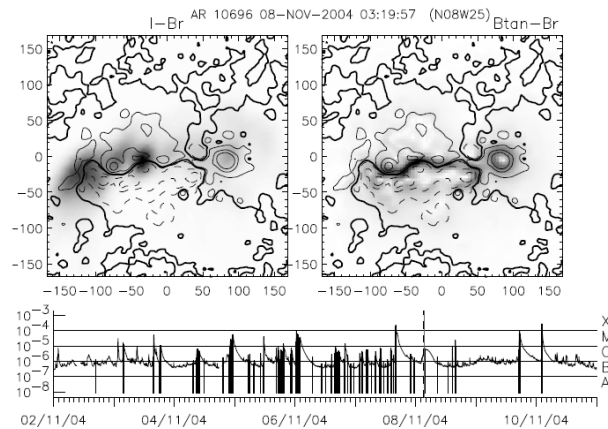


Рис. 7. АО 10696. Один NLS.

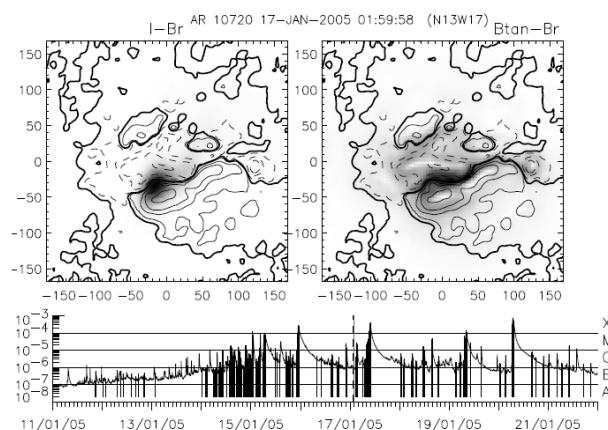


Рис. 8. АО 10720. Один NLS.

Заключение и выводы

Все проанализированные АО, производившие X-LDE события, показали обязательное присутствие, по крайней мере, одного NLS-источника

NLS появляются в АО за 1–5 сут до начала события X-LDE; большую часть своей жизни источники, зарегистрированные как NLS, сохраняют четкие признаки своей идентификации, т.е. располагаются вблизи максимума тангенциального поля над нейтральной линией радиального поля.

Новый метод идентификации NLS по радиальной и тангенциальной магнитным составляющим показал себя удобным инструментом выделения радиоисточников, связанных с подготовительной фазой крупных вспышек.

Наряду с полученным конкретным результатом работы, важно отметить ее методический момент, связанный с использованием для расчета необходимых магнитных компонент потенциального приближения. Изначально правомерность такого упрощенного описания магнитной структуры применительно к рассматриваемым заведомо непотенциальным явлениям выглядит весьма спорным. Тем более интересным выглядит полученный результат, показывающий эффективность практического применения такого простого приближения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты: 06-02-16239, 07-02-00101).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uralov A.M., Nakajima H., Zandanov V.G., Grechnev V.V. Current-sheet-associated radio sources and development of the magnetosphere of an active region revealed from 17 GHz and Yohkoh data // *Solar Phys.* 2000. V. 197, iss. 2. P. 275–312.
2. Uralov A.M., Rudenko G.V., Rudenko I.G. 17 GHz Neutral Line Associated Sources: Birth, Motion, and Projection Effect // *PASJ.* 2006. V. 58, N 1. P. 21–28.
3. Уралов А.М., Руденко Г.В., Гречнев В.В. и др. Микроволновый источник над нейтральной линией – источник под токовым слоем // Сб. тр. Всероссийской конференции «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности». п. Нижний Архыз, КЧР, 28 сентября–2 октября 2006 г. САО РАН, 2006. С. 484–513
4. Rudenko G.V. Extrapolation of the solar magnetic field within the potential-field approximation from full-disk magnetograms // *Solar Phys.* 2001. V. 198, iss. 1. P. 5–30.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск