

УДК 523.98+523.985

ПОВЫШЕННАЯ ЯРКОСТЬ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КАК ПРИЗНАК ВСПЫШЕЧНО-ПРОДУКТИВНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 12371

© 2022 г. Н. Г. Петерова¹, *, Н. А. Топчило², **, Е. А. Курочкин¹, ***

¹Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН (СПбФ САО РАН),
г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ),
г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: peterova@yandex.ru

**e-mail: topchilona@yandex.ru

***e-mail: k-u-r-o-k@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.05.2021 г.

После доработки 12.08.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Продолжена разработка методов прогнозирования солнечных вспышек с использованием наблюдений в микроволновом диапазоне волн на радиотелескопах с высоким угловым разрешением. Приведены результаты анализа наблюдений активной области NOAA 12371, в квазиспокойном состоянии отличавшейся повышенной яркостью излучения в микроволновом диапазоне и породившей множественные эруптивные события. По наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 в период события 21.06.2015 г. зафиксировано резкое изменение структуры изображения источника микроволнового излучения над NOAA 12371, предположительно интерпретированное кратковременным нагревом плазмы над областью дельта-конфигурации магнитного поля в хвостовой части активной области. Благодаря высокой чувствительности РАТАН-600 при поляризационных измерениях удается в рамках известных моделей магнитного поля локализовать положение облака, в котором происходит высвечивание или ускорение быстрых частиц.

DOI: 10.31857/S001679402201014X

1. ВВЕДЕНИЕ

В исследовании солнечных вспышек одним из наиболее важных вопросов является механизм их образования. Существует ряд моделей возникновения вспышек (см., например, книгу [Филиппов, 2007]). Согласно этим моделям, особенности физических параметров солнечной плазмы перед вспышкой должны себя обнаруживать целым рядом проявлений. В числе такого рода признаков вспышечной активности находится заблаговременное (до 5 сут) увеличение яркости микроволнового излучения отдельных деталей структуры квазиспокойных источников, расположенных над активными областями (далее – АО). Такого рода явления были замечены еще при наблюдениях Солнца на БПР (Большой Пулковский радиотелескоп САО РАН) [Ихсанова, 1971], в дальнейшем одно из них было изучено особенно тщательно, уже по наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 с использованием наблюдений на малых зеркалах во время затмения 1976 г. [Peterova and Korzhavin, 1998]. Оказалось, что

предвспышечную активизацию прежде всего “чувствуют” наблюдения на коротких волнах, а именно, на волне ~2 см, и причиной активизации является образование новой активной области в непосредственной близости от старого одиночного пятна.

Прогнозирование вспышечной активности Солнца по наблюдениям на РАТАН-600 регулярно ведется с сентября 2011 г. и публикуется на сайте (<http://www.spbf.sao.ru/prognoz/>). Метод базируется на известном критерии Танака–Еноме (далее – сокращенно КТ-Е) [Tanaka and Kakimoto, 1964; Tanaka and Énomé, 1975], который представляет собой набор характеристик микроволнового излучения, присущих вспышечно-активной АО. Согласно этому критерию, протонные вспышки могут возникать в АО, у которых: 1) спектральная плотность потока излучения на частоте 9.4 ГГц (F_3) больше 10 солнечных единиц потока ($F_3 \geq 10$ с.е.п.), 2) отношение потоков на частотах 9.4 ГГц и 3.75 ГГц (F_8) больше 1 ($F_3/F_8 \geq 1$) и 3) структура циркулярно-поляризованного из-

лучения на частоте 9.4 ГГц носит сложный (биполярный или мультиполярный) характер — так называемые Е- и Р-конфигурации. Одним из основных достоинств метода является возможность количественной оценки двух первых параметров, что позволило автоматизировать процесс обработки [Bogod and Tokhchukova, 2003] — к примеру, на известном прогностическом сайте (<https://www.solarmonitor.org>) окончательный прогноз составляется вручную.

Метод КТ-Е подвергался неоднократной проверке по наблюдениям на независимых инструментах [Emmoku, 1979; Коробчук и Петерова, 1980; Borisevich et al., 2004; Korzhavin et al., 2006], показавшей его высокую оправдываемость (0.7–0.9). Однако критерий еще не исчерпал своих возможностей и может быть усовершенствован. Перспективы в этом направлении связаны главным образом с использованием более широкого спектрального диапазона и более полным его заполнением, с учетом положения активной области на диске Солнца. Среди исследований в этом направлении особого внимания заслуживают работы [Максимов и др., 1996; Бакунина и др., 2008; Smolkov et al., 2009], в которых предложена оригинальная методика диагностики вспышечно-продуктивных АО — “Двухчастотный критерий нормальных долготных зон”, учитывающая так называемые “геометрические эффекты” смены знака (инверсию) поляризации. Аналогично КТ-Е [Enomé et al., 1969], предложенный метод двухчастотный, но работающий на частотах 17 ГГц и 5.7 ГГц и базирующийся на регулярных наблюдениях радиогелиографа NoRH (Nobeyama Radioheliograph) и радиоинтерферометра ССРТ (Сибирский солнечный радиотелескоп) соответственно. Была также модернизирована поляризационная составляющая КТ-Е. Благодаря более высокому пространственному разрешению используемых наблюдений выявлена тонкая структура циркулярно-поляризованного излучения и исследована ее динамика в зависимости от положения АО на диске Солнца. Оказалось, что при нахождении АО в центральной зоне (долготы $\sim \pm 35^\circ$ от ЦМ) на обеих волнах “нормальное распределение поляризации” соответствует Е-конфигурации, а с приближением к лимбу преобразуется в S-конфигурацию. Изменение структуры объясняется в рамках известного эффекта инверсии знака поляризации при распространении циклотронного излучения через область поперечного магнитного поля (далее — МП) [Cohen, 1960; Takakura, 1961]. Прогноз вспышечной активности осуществляется путем сопоставления реально наблюдаемого распределения поляризации с “нормальным распределением”, зависящим от долготы АО.

Одновременно, с целью повышения оправдываемости прогнозов, издавна велись поиски и исследовались новые характеристики АО, к приме-

ру, скорость роста потока излучения [Гельфрейх и др., 1989]. В нашем исследовании, на примере АО 12371 также поставлена задача модификации методов прогнозирования не путем уточнения известных критериев, а введением нового, дополнительного параметра (яркость микроволнового излучения), позволяющего выявлять вспышечно-продуктивные АО.

Прошедший 24-й цикл солнечной активности отличался очень низким уровнем, что, однако, предоставляет дополнительные возможности для исследования мощных событий, особенно их предвсплесковой стадии, обеспечивая изолированность изучаемой АО, к примеру, для наблюдений в радиодиапазоне с недостаточным угловым разрешением (малые зеркала) и высоким одномерным разрешением (ПАТАН-600). Здесь мы приводим результаты исследования АО 12371, наблюдавшейся на фазе спада 24-го цикла солнечной активности (июнь 2015 г.).

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

В качестве основного наблюдательного материала использованы регулярные наблюдения радиоизлучения Солнца, взятые из архива данных двух крупнейших инструментов — радиотелескопа ПАТАН-600 (<http://www.spbf.sao.ru/prognoz/>) и радиогелиографа NoRH (<https://solar.nro.nao.ac.jp/norh/archive.html>), разнесенных по долготе на ~ 6 ч времени — момент местного полдня LT = (02:44 $\pm$ 00:15) UT (NoRH) и (09:15 $\pm$ 00:15) UT (ПАТАН-600). Обработка выполнялась с применением штатных программ. Сведения (ряд ежедневных значений) о максимальной яркостной температуре микроволнового излучения Солнца T_B (peak) были получены нами для 2015 г. из приводимых на сайте NoRH изображений полуденных карт. Обработка сканов ПАТАН-600 велась по опробованным ранее методикам [Tokhchukova, 2011]. Точность измерения плотности потока излучения на ПАТАН-600 зависит от интенсивности источника и составляет (10–30)%. Для отождествления отдельных деталей структуры радиоизображения активных областей использовались наблюдения Солнца в оптическом, ультрафиолетовом (УФ) и рентгеновском (X-ray) диапазонах, предоставляемые в свободном доступе — SDO/(HMI и AIA) (<http://jsoc.stanford.edu/>), GOES/(SXI и SXR) (<https://satdat.ngdc.noaa.gov/>) и др.

Выбор активной области для исследования не был случайным — он определялся из анализа поведения максимальной яркостной температуры T_B (peak), измеряемой ежедневно по наблюдениям на радиогелиографе NoRH примерно в момент местного полдня (02:44 UT). На рисунке 1 представлен график T_B (peak) для 2015 г.

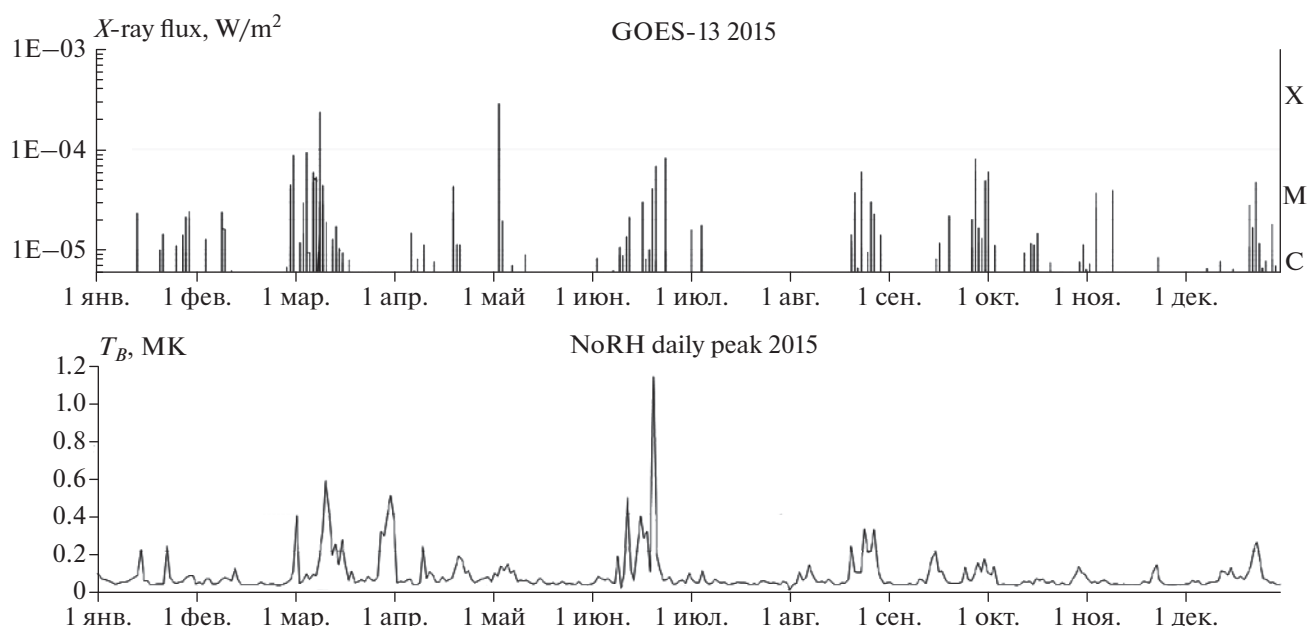


Рис. 1. Мощность X-гау потока в диапазоне вспышек M- и X-классов (вверху) и значение максимальной яркости радиоизлучения Солнца T_B (peak) по наблюдениям на NoRH в 2015 г.

Для исследования выбрана АО 12371, для которой во время наблюдений на NoRH (21.06.2015 г.) произошла вспышка класса M и были зарегистрированы рекордные значения T_B (peak) — >1 МК (см. рис. 1).

3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА NOAA 12371

Активная область NOAA 12371 принадлежит к разряду быстро развивающихся АО — она существовала только в течение одного оборота Солнца и наблюдалась в период 16.06.2015 г. (восход) — 29.06.2015 г. (заход). Ее широта $\phi = N13$, момент прохождения через ЦМ Солнца ПЦМ = 21.06.2015 г., морфологический класс — F, магнитный класс — β , максимальная площадь пятен $S_p = 1150$ м.д.п. (в момент ПЦМ). Величина МП в отдельных пятнах достигала 2.5 КГс. Отличительной особенностью являлась δ -конфигурация МП в хвостовой части АО. Вспышечная активность была высокой — всего за весь период существования отмечено ~ 30 вспышек, 5 из них класса M (M2.0—M7.9).

Динамика структуры источника микроволнового излучения над АО 12371 по наблюдениям на РАТАН-600 (сканы) и NoRH (карты) показана на рис. 2. Выбраны моменты квазиспокойного состояния, когда в АО отсутствовали вспышки балла $>C4$, однако в радиодиапазоне яркость ее излучения была достаточно высокой, в период восхода (18.06.2015 г.) над головным пятном в АО по данным NoRH она достигает 270 КК, т.е. превы-

шает яркость фонового излучения (10 КК) более чем на 1.5 порядка.

Анализ характеристик радиоисточника над АО 12371 (см. рис. 3), показывает, что все 3 параметра КТ-Е в данном случае оправдываются. Действительно, значение потока излучения $Flux$ (3 см) > 10 с.е.п. (1 с.е.п. = 10^{-22} Вт/(м² Гц)), отношение потоков $Flux$ (3 см)/ $Flux$ (10 см) > 1 . А структура поляризационного изображения характеризуется типом Р или Е, что достаточно хорошо согласуется с “Двухчастотным критерием нормальных долготных зон” [Бакунина и др., 2008; Smolkov et al., 2009]. На рисунке 2 хорошо видно, что вблизи Е-лимба наблюдается инверсия знака поляризации над хвостовой частью АО, вследствие чего общая структура изображения приобретает вид S-конфигурации.

4. СОБЫТИЕ 21.06.2015 г.

Согласно данным GOES (см. рис. 4), весь день 21.06.2015 г. был очень активным, в первой половине дня уровень активности определяла АО 12371, а во второй — находившаяся на заходе АО 12367. Вспышка класса M в АО 12371 была длительной — более 5 ч. Различные ее стадии наблюдались сначала на NoRH, а затем на РАТАН-600 (периоды отмечены на рис. 4). Мощность рентгеновского излучения в этом событии достигала в максимуме значения M2.6, к моменту наблюдений на РАТАН-600 уровень активности снизился до C1.0.

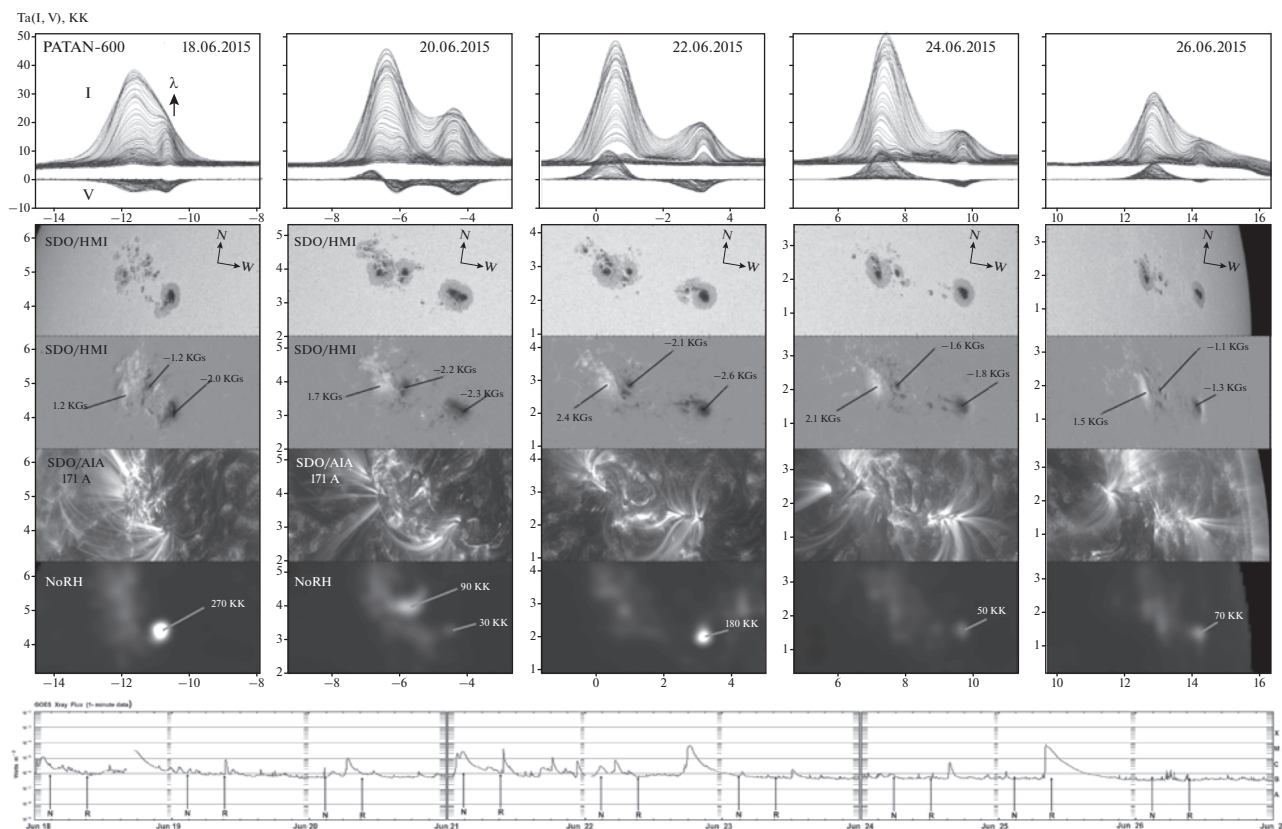


Рис. 2. Динамика АО 12371 по наблюдениям на ПАТАН-600 (09:15 UT) и NoRH (02:44 UT) вблизи момента местного полдня, прослеженная от восхода до захода АО. Здесь же представлена динамика изображений по наблюдениям в оптическом, X-ray (GOES) и УФ-диапазонах (SDO) на момент (09:15 UT). Оси абсцисс на картах в угловых минутах.

Подробное описание, анализ и сценарий начального этапа события, наблюдавшегося на NoRH, приведены в работе [Lee et al., 2018]. Авторы разделили этот этап на две фазы: 1) импульсная и 2) всплеск типа Post Burst Increase (PBI). Граница (~01:40 UT) между ними хорошо видна (см. рис. 5), на ней меняется характер спектра: импульсная фаза отличается сильным смещением максимума спектра в сторону коротких волн. В дальнейшем наблюдается увеличение потока с ростом длины волны. Благодаря высокому временному разрешению NoRH также видно, что в ходе события происходили очень кратковременные выбросы (типа δ -функции). В конце события на длинных волнах регистрируется целый пакет выбросов, возможно связанных со всплесками в метровом диапазоне волн (типа II и IV).

Наблюдения на ПАТАН-600 пришлись на момент самого конца вспышки M2.6. В этот период удалось выявить интересные особенности динамики характеристик источника микроволнового излучения над АО 12371 — это депрессия излучения, особенно хорошо проявившаяся в яркости отдельных деталей структуры источника над АО 12371 (см. рис. 6a). ПАТАН-сканы АО 12371

приведены к одному масштабу, депрессия излучения наиболее заметна в хвостовой части АО на коротких волнах (минимум в 09:15 UT). Обращает на себя внимание необычный вид (см. рис. 6b) профиля ПАТАН-сканов, фиксируемый в 09:15 UT, который мы интерпретируем как аппаратный дефект, возникающий вследствие недостаточности динамического диапазона при резком кратковременном увеличении амплитуды принимаемого сигнала. По положению относительно пятен, эффект приходится на пространство между разнополярными пятнами. Согласно наблюдениям на ПАТАН-600 (см. рис. 2), после того, как к 19.06.2015 г. в хвостовой части группы АО 12371 из большого набора мелких пор, теней и полутеней сформировались достаточно локализованные пятна, все оставшиеся дни в хвостовой части регистрировался источник с преобладанием яркости над пятном N-полярности.

Анализ магнитного поля АО на момент самой глубокой депрессии (09:15 UT, см. рис. 6) не выявляет никаких особенностей в величине МП — согласно SDO/HMI во всех пятнах оно составляет ~2 КГс, и только в главном пятне достигает значения 2.5 КГс.

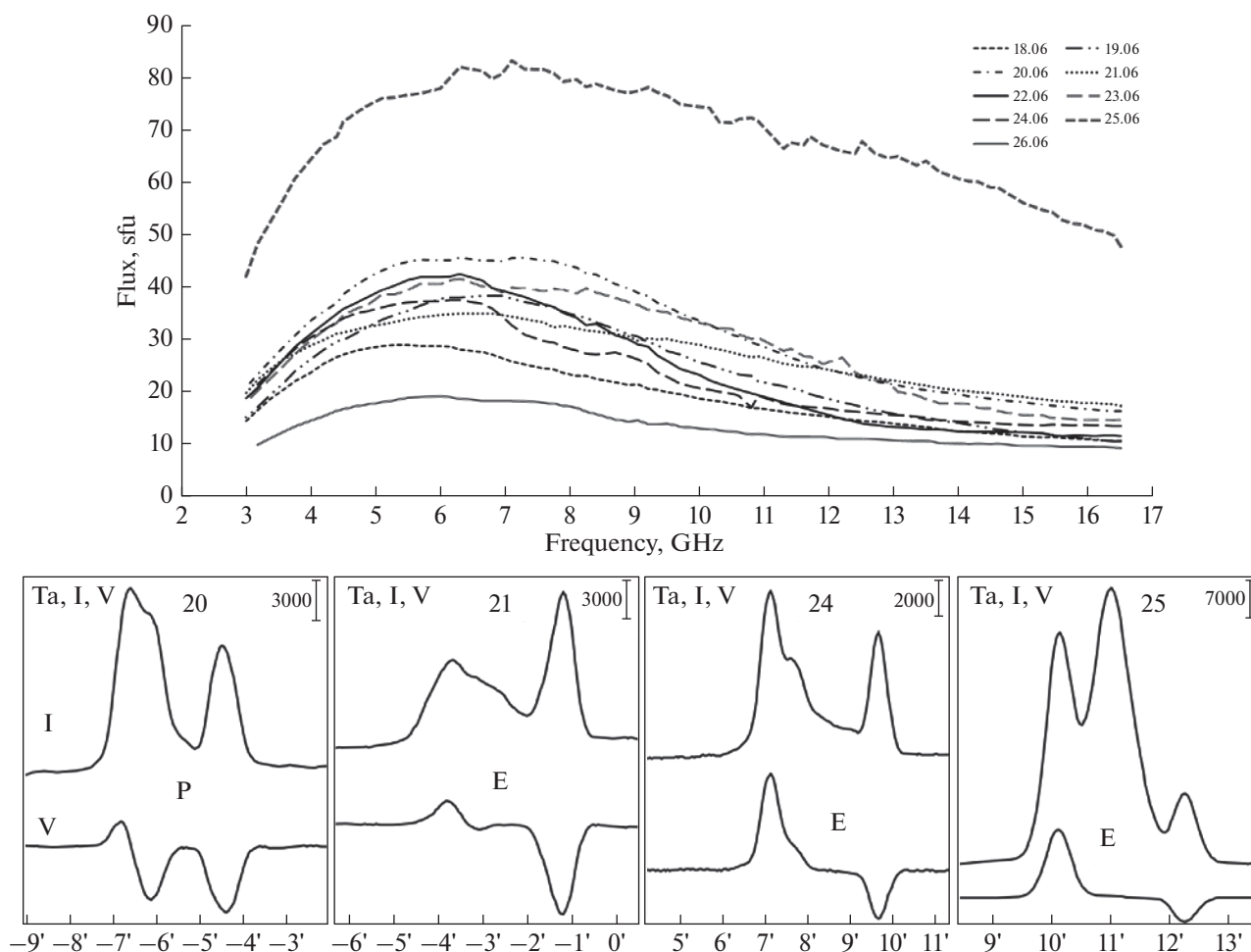


Рис. 3. Характеристики источника микроволнового излучения над АО 12371 на все дни периода (18–26).06.2015 г. по наблюдениям на РАТАН-600 в момент местного полдня ~09:15 UT. Вверху — спектральная плотность потока излучения (*Flux*), внизу — структура поляризационного изображения в параметре Стокса V (тип S, E, P). Наблюдения 25.06.2015 г. попали на момент вспышки. Оси абсцисс на графиках в угловых минутах.

Сопоставление с наблюдениями в УФ-диапазоне тоже не выявляет, на первый взгляд, заметных изменений в крупномасштабной структуре излучения (вроде выброса холодного вещества, см. верхний ряд рис. 7 в линии $304 \text{ \AA}$, логарифм эффективной температуры образования линии $\lg T = 4.7$). В линии $171 \text{ \AA}$ отчетливо видна устойчивая аркада петель над искривленной нейтральной линией магнитного поля АО. Динамика этой аркады проявляется в изменении яркости отдельных петель.

В процессе формирования хвостовых пятен наблюдаются разнонаправленные вращательные движения отдельных частей АО. В целом хвостовая часть немного поворачивается против часовой стрелки, растягивая группу. С другой стороны, формирующееся левое пятно (той же полярности, что и головное) вращается по часовой стрелке, деформируя нейтральную линию фото-

сферного МП, что в конечном итоге, вероятно, и привело к вспышке 21.06.2015 г.

Считается, что всплески связаны со всплытием МП, и с этой точки зрения обращают на себя внимание процессы типа Emerging Flux. Служба эруптивных процессов на Солнце НЕК (Helio- physics Events Knowledgebase) (<https://www.lmsal.com/isolsearch>) отмечает, что в момент времени ~03:00 UT в АО 12371 наблюдается явление типа EMERGING FLUX. Явления этого типа начали наблюдаться с самого момента восхода АО 12371, и их количество вплоть до захода АО составляло (3–5) в сутки, с резким увеличением (вдвое) для 21.06.2015 г. Согласно Parker [1977], типичный сценарий явления типа Emerging Flux состоит в том, что “magnetic fields are twisted underneath the photosphere due to flows and rise to form an Ω -loop due to magnetic buoyancy”.

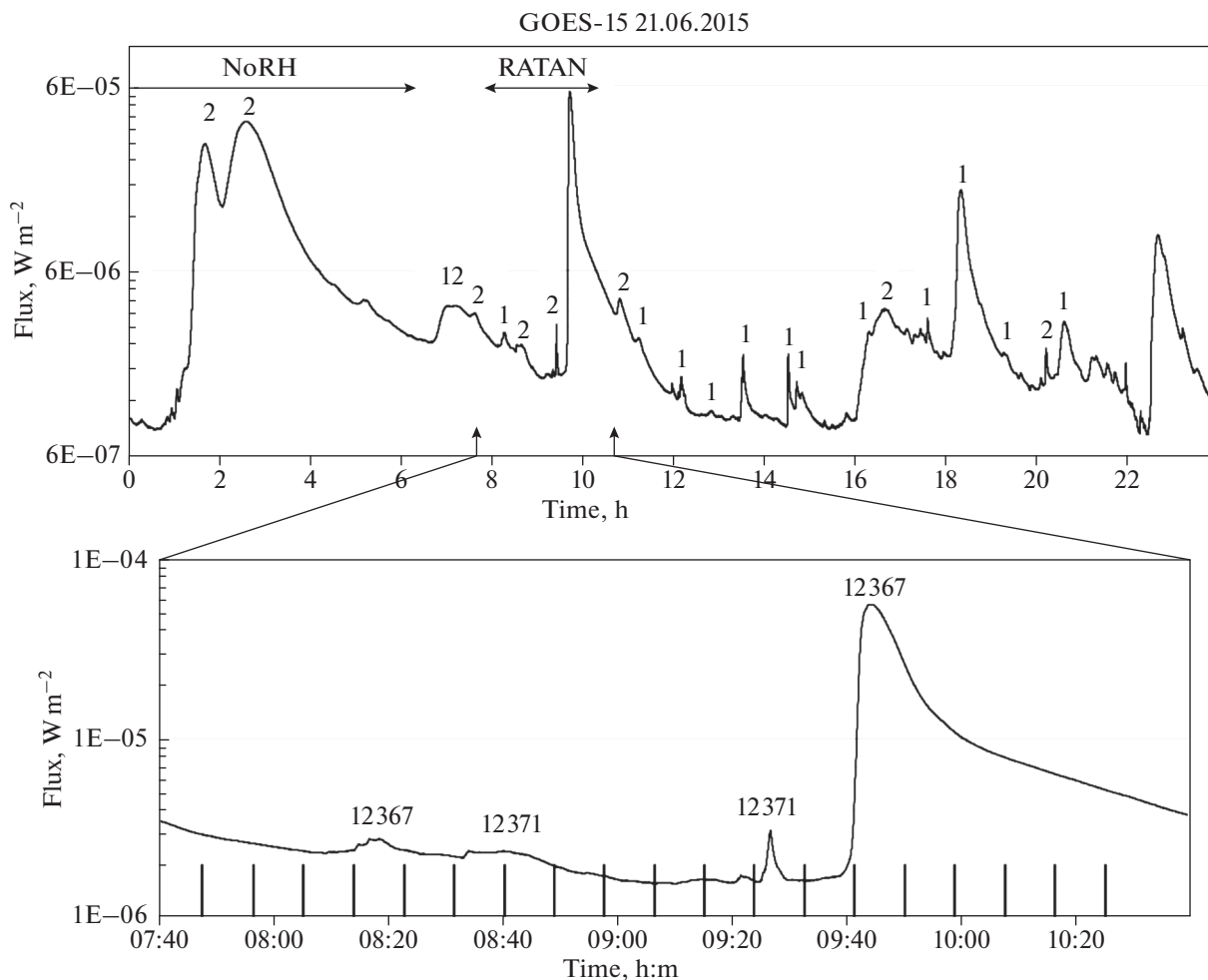


Рис. 4. Данные GOES-15, на верхнем рисунке в период всего дня 21.06.2015 г., а на нижнем более подробно — в период наблюдений на РАТАН-600, моменты начала и конца которых показаны вертикальными линиями. На верхнем рисунке показано отождествление отдельных пиков — цифра 1 соответствует АО 12367, цифра 2 — АО 12371.

Следует заметить, что выявленное нами резкое искажение профиля РАТАН-сканов было очень кратковременным, его длительность составляет (2–3) с. В то же время скважность наблюдений в УФ, необходимая для сопоставления, составляет в лучшем случае 12 с, что недостаточно для надежного отождествления источника и выяснения причин, вызвавших эти искажения. Их можно уточнить при наличии некоторых предположений с учетом наблюдений, выполненных на NoRH с высоким двумерным разрешением. Согласно Lee et al. [2018], в период начальной фазы события 21.06.2015 г. на NoRH-картах регистрируется источник, вытянутый вдоль нейтральной линии МП с максимумом яркости, достигающей очень больших значений — 87 МК (в момент 01:36 UT). Положение этой точки (см. рис. 8) приходится на область δ -конфигурации МП и сохраняется практически неизменным в течение

длительного времени (01:25–02:40) UT. Возможно, и через 6 ч эта область продолжала быть неустойчивой и могла породить выброс, зарегистрированный в наблюдениях на РАТАН-600.

Согласно Lee et al. [2018], магнитное поле АО 12371 можно представить в виде совокупности из 5 взаимодействующих систем силовых линий (C0, C1, C2, C3 и C4 — см. левый кадр на рис. 8), из которых наиболее вспышечно-опасной является highly sheared-система C1. Она была расположена вдоль нейтральной линии МП и ортогональна по отношению к системе петель C2. Видно, что перед самым началом вспышки (в 01:25 UT) наибольшая яркость на NoRH-картах отмечается в основаниях этой петли, затем положение точки максимальной яркости (X) смещается к середине этой петли, что позволяет интерпретировать ее как вершину системы C1. Эта точка хорошо ложится на область локальной депрессии изображе-

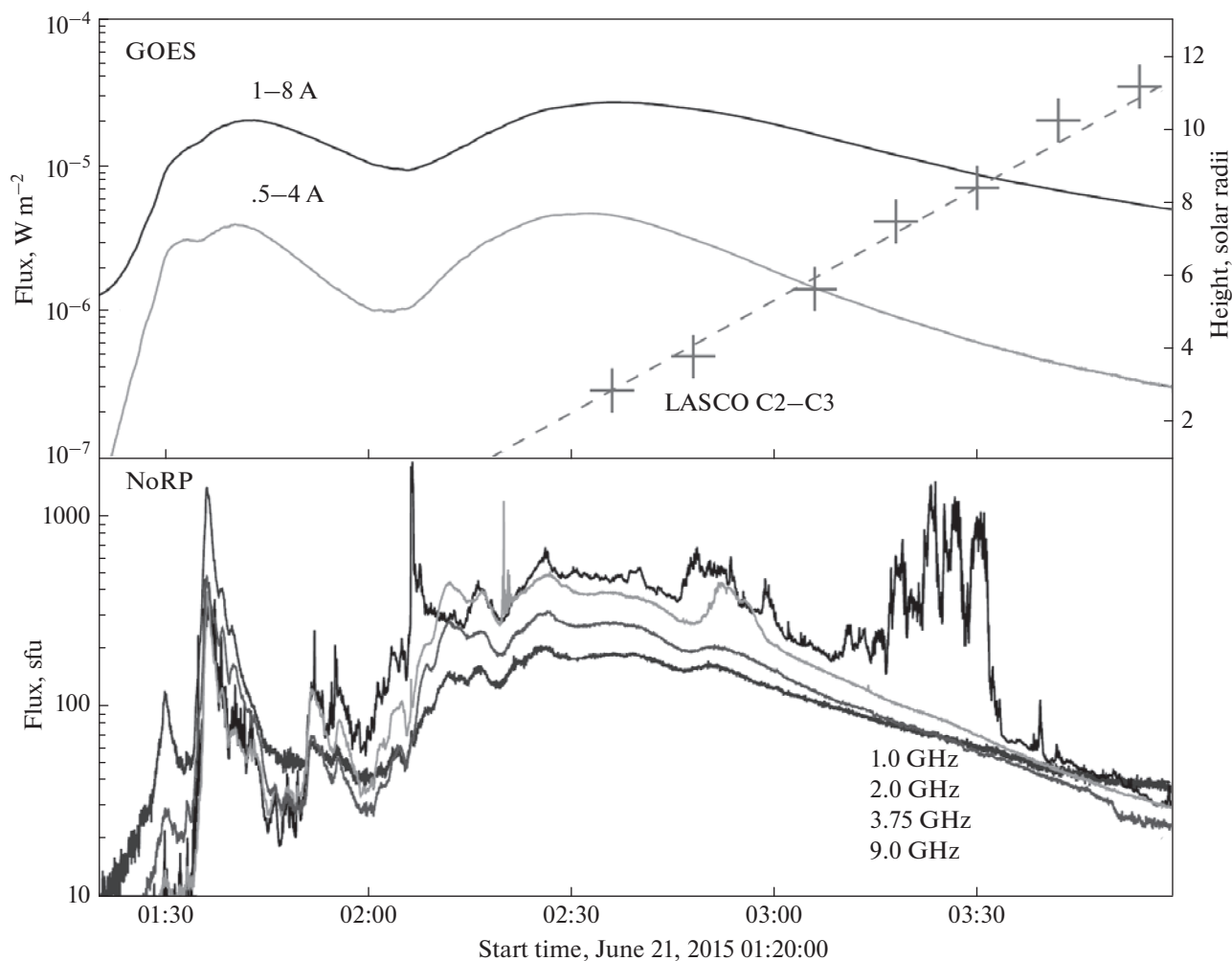


Рис. 5. Наблюдения на поляриметре NoRP, взятые из работы [Lee et al., 2018].

ния АО 12371 на РАТАН-сканах, таким образом, косвенно уточняя одномерные наблюдения.

5. ДИСКУССИЯ

Для решения поставленной задачи выбор активной области NOAA 12371 был удачным — она оказалась принадлежащей к тому типу групп пятен, которые издавна привлекают внимание исследователей Солнца, прежде всего, своей высокой вспышечной активностью. События класса X случаются достаточно редко, в 2015 г. их было всего 2 (см. рис. 1), причем одно из них (вспышка 05.05.2015 г.) — из разряда не отождествленных. Трудно ожидать, что прогнозирование единичных событий класса X в настоящее время возможно с достаточной временной точностью. Другое дело, когда иногда они подряд происходят в течение нескольких дней, однако обычно не более 2–4 сут. События класса M гораздо более многочисленны (см. рис. 1) и демонстрируют тенденцию

группироваться и существовать в течение нескольких дней (порядка жизни отдельной АО). В такую группу (16–27 июня 2015 г.) попадает и выбранная нами АО 12371, возникшая в период слабой вспышечной активности Солнца (<C7), длившейся с апреля по август 2015 г. В ней не было крупных событий класса X, однако метод КТ-Е, для выявления которых он предназначен, полностью оправдался. Это позволяет расширить диапазон действия КТ-Е в его классическом виде и распространить его на АО меньшей площади (~300 м.д.п.) для центральной зоны диска. Применимость модифицированного метода КТ-Е [Бакунина и др., 2008] на данных радиотелескопа РАТАН-600 нами не исследовалась.

Что отражает новый параметр T_B (peak), предлагаемый нами в качестве прогностического? На примере исследования АО 12371 можно видеть (см. рис. 2), что максимальная температура излучения, как правило, отмечается в главном пятне АО. Особенно она велика 18.06.2015 г. еще

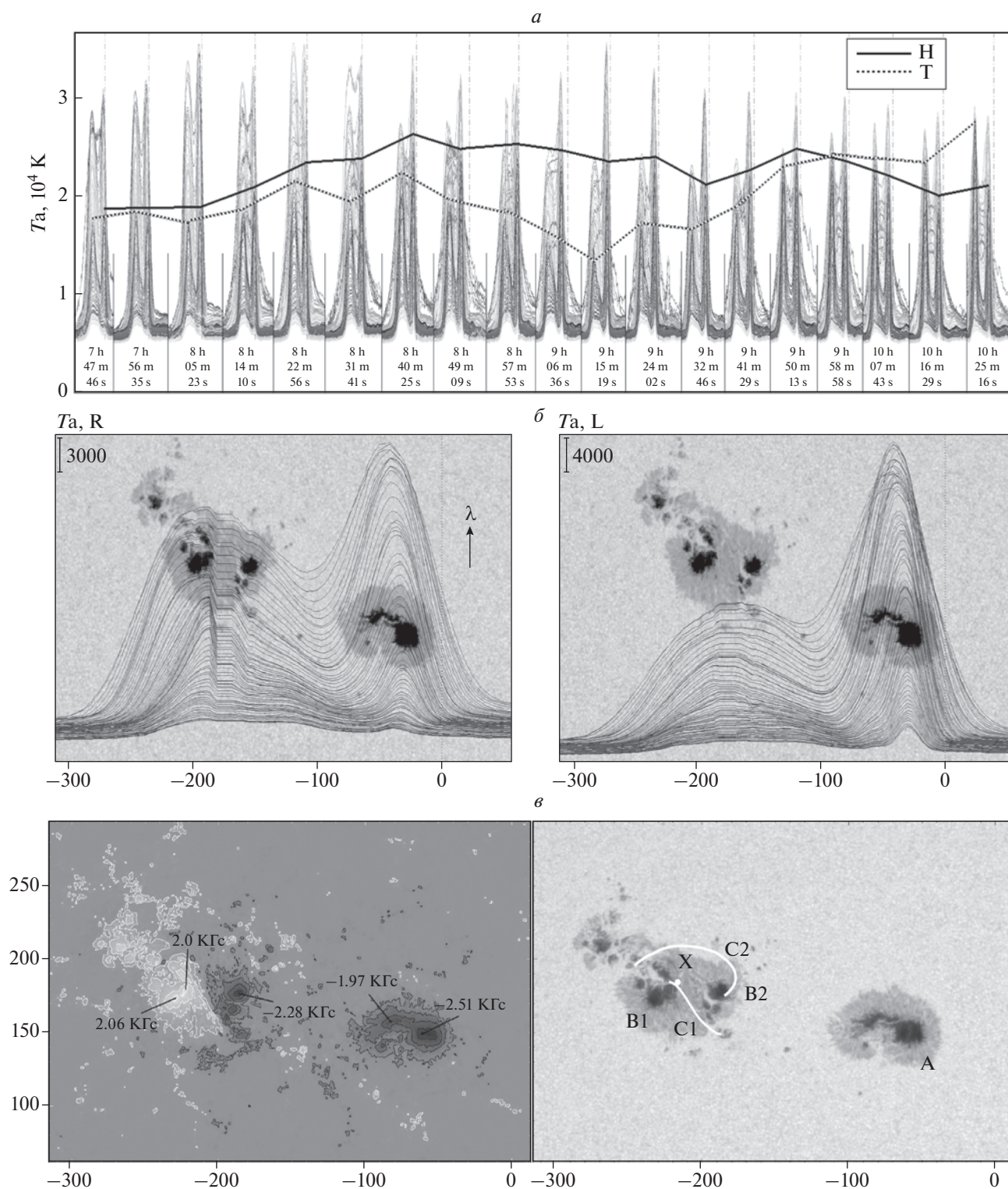


Рис. 6. Наблюдения АО 12371 в азимутах на РАТАН-600 21.06.2015 г.: (а) — динамика яркости излучения над головным и хвостовыми пятнами АО (кривые Н и Т соответственно) по наблюдениям на частоте 10 ГГц; (б) — РАТАН-сканы на момент 09:15 UT в R- и L-поляризации, наложенные на изображение в белом свете (SDO/HMI); (в) — магнитограмма (слева) и фотогелиограмма (справа) АО 12371 (SDO/HMI). На фотогелиограмме двумя белыми кривыми показаны характерные линии магнитного поля для системы петель C1 и C2 в модели [Lee et al., 2018] в предвысшечный период. Координаты на графиках (б) и картах (в) даны в угловых секундах.

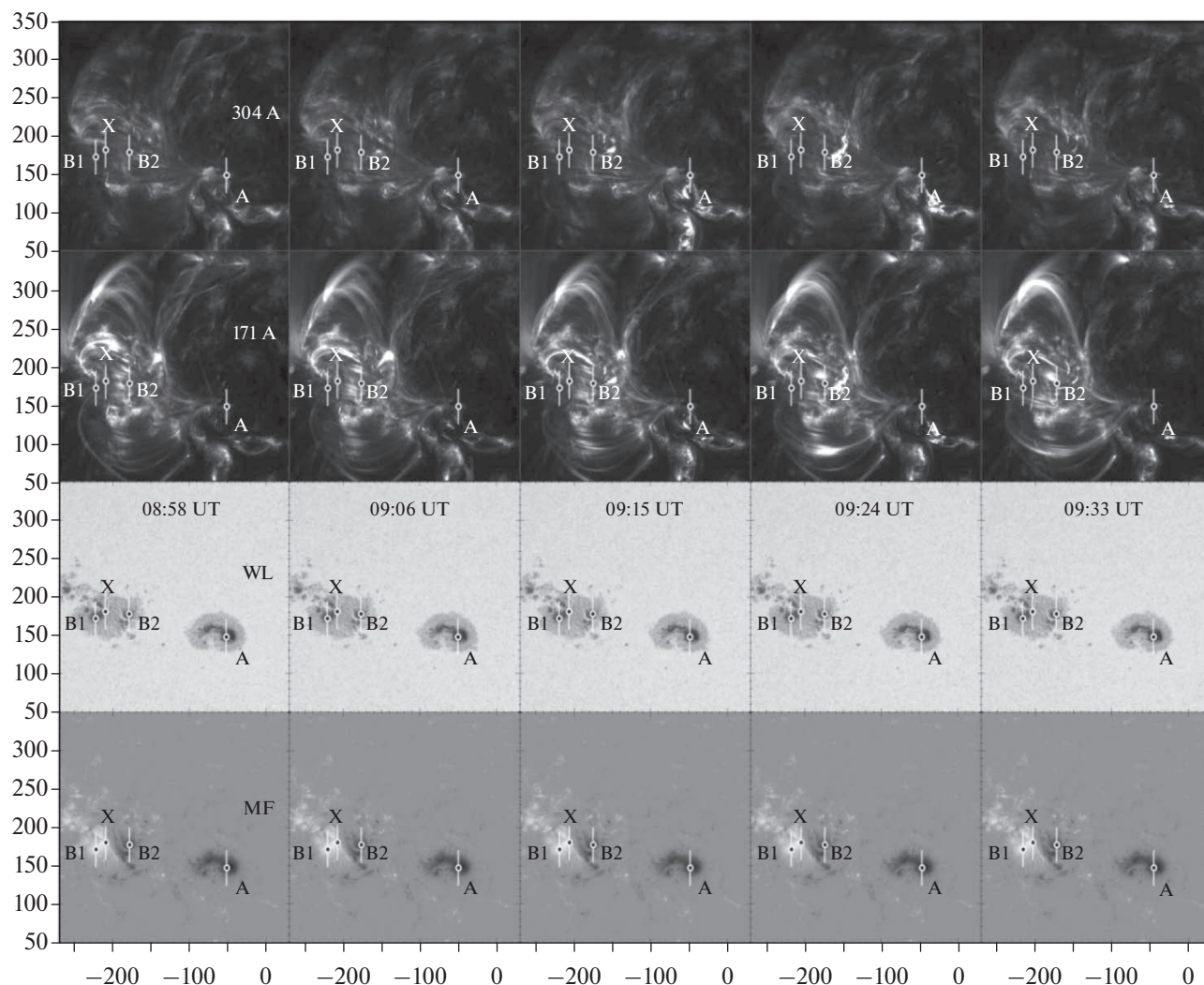


Рис. 7. Динамика структуры изображения АО 12371 в период максимального значения депрессии микроволнового излучения, зарегистрированной при наблюдениях на РАТАН-600 21.06.2015 г. (08:58–09:33) UT. В эти моменты на всех изображениях отмечено положение максимума магнитного поля (белые круги с вертикальными линиями) для головного пятна (A), хвостовых пятен (B1 и B2), а также положение наиболее яркой точки (X), выявляемой на NoRH-картах, полученных в период начальной фазы события (01:25–02:40) UT. Координаты на графиках даны в угловых секундах.

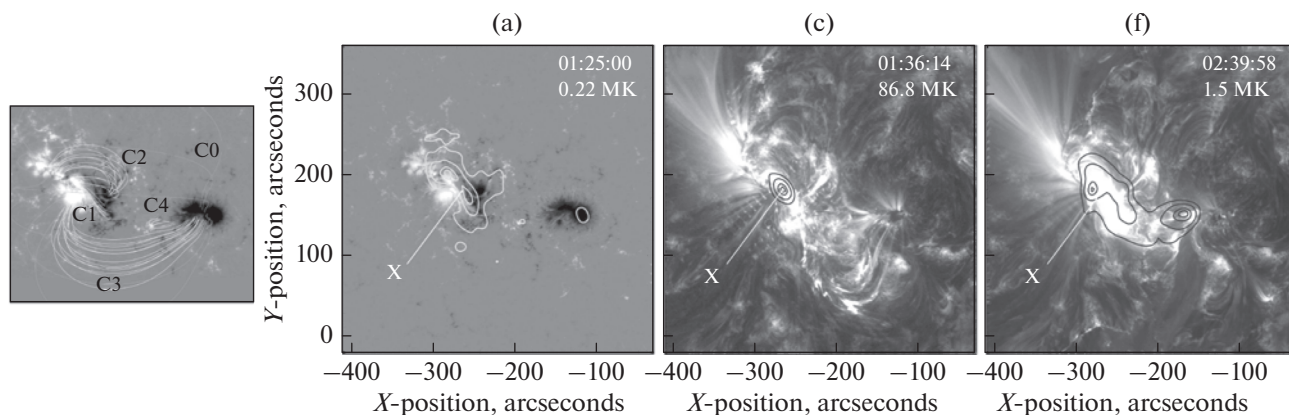


Рис. 8. Иллюстрация к наблюдениям начальной фазы события 21.06.2015 г. в АО 12371. Слева — модель коронального МП, взятая из [Lee et al., 2018]. Справа — изолинии NoRH-карт наложены на магнитное поле (SDO/HMI) и УФ-изображения в линии 171 Å (SDO/AIA).

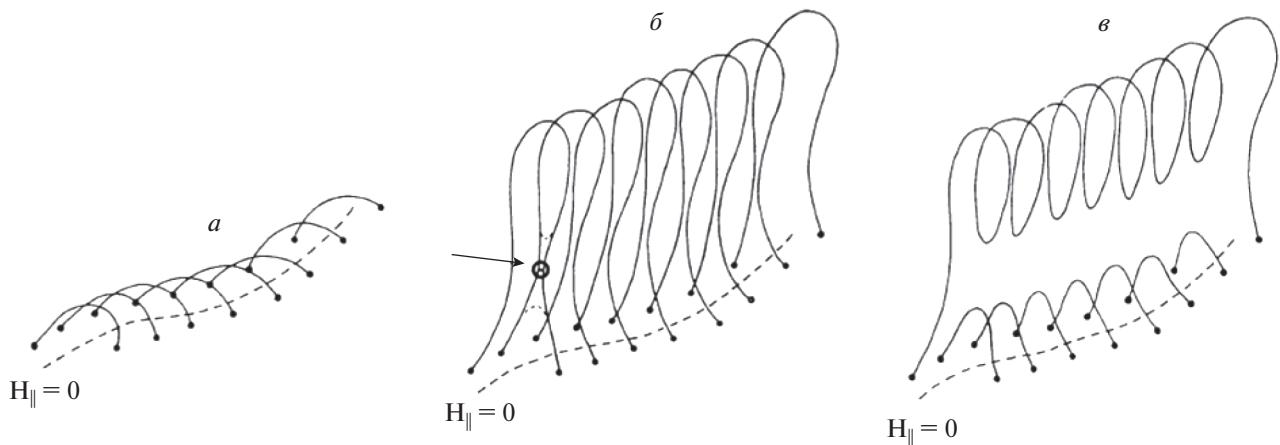


Рис. 9. Модель коронального магнитного поля над нейтральной линией ($H_{\parallel} = 0$) в активной области и процесса перезамыкания соседних силовых линий как причины возникновения вспышки (из [de Jager and Svestka, 1985]).

до главных вспышек (21.06.2015 г. и 25.06.2015 г.), в период развития АО. Накануне первой из этих вспышек (20.06.2015 г.) наиболее яркой деталью структуры оказывается хвостовая часть АО. Самой яркой она остается и во время вспышки (см. рис. 8), только к концу микроволнового всплеска такой же яркости достигает и деталь над главным пятном. Случай АО 12371 показывает, что если бы “синоптик” из Службы Космической Погоды (Space Weather Prediction Center (<https://www.swpc.noaa.gov/>)), увидев яркую АО на самом ее восходе, дал бы положительный прогноз на весь период до ее захода, то этот прогноз оправдался бы.

На основе наблюдений за весь 2015 г. (см. рис. 1) можно сделать оценку величины параметра T_B (peak), характерную для АО, способных производить события класса М, предварительно она составляет ~ 0.3 МК. Статистически значимую оценку можно надеяться получить, если использовать в большем объеме архив наблюдений на NoRH (архив ведется с 1992 г.). Возможно развитие работы в таком же направлении и по наблюдениям на РАТАН-600 с расширением диапазона частот в сторону миллиметровых волн.

Для интерпретации результатов наблюдений события 21.06.2015 г. в АО 12371, выполненных на радиогелиографе NoRH и радиотелескопе РАТАН-600, вполне подходящей оказалась одна из наиболее ранних работ, посвященных вспыхнуто-продуктивным АО, а именно [de Jager and Svestka, 1985], в которой собран весь имевшийся на тот момент материал наблюдений события 21.05.1980 г. и дана модель аркады петель над нейтральной линией МП, объясняющая особенности динамики структуры в процессе вспышки.

Согласно этой модели, если предвспыхивающая нейтральная линия искривлена и расширяется вверх, может произойти перезамыкание (kink)

между соседними петлями, в результате которого, кроме нижней системы петель, образуется еще и верхняя. Такая модель хорошо согласуется с наблюдениями АО 12371 на микроволнах и в УФ-диапазоне (см. рис. 8) — изначально компактный источник над нейтральной линией постепенно расширяется.

Работа [de Jager and Svestka, 1985] выполнена еще во времена доспутниковой астрономии. Используя современные возможности (SDO, NoRH), авторы [Lee et al., 2018] уже показывают, как реально выглядит аркада петель над нейтральной линией МП (в АО 12371) и могут определить место, где находится “kink” — источник первичного выделения энергии в период начальной фазы вспышки 21.06.2015 г. Оно соответствует области наибольшего градиента МП (δ -конфигурация) и излому нейтральной линии (см. рис. 7). Радиотелескоп РАТАН-600, благодаря высокому спектральному разрешению ($\sim 1\%$) и высокой чувствительности поляризационных наблюдений, дает возможность оценить, на какой высоте над уровнем фотосферы находилась область, которая высветилась в результате кратковременного пролета ускоренных электронов (09:15:19 UT). Вид РАТАН-сканов АО 12371 на этот момент (см. рис. 6) показывает, что наибольший эффект регистрируется в R-поляризации излучения, которая соответствует необыкновенной (е-) моде для МП основного пятна В1 с N-полярностью в хвостовой части АО. Кроме того, видно, что эффект максимален в диапазоне (6–7) ГГц. В рамках теории циклотронного излучения и модели МП солнечных пятен можно сделать вывод, что толщина слоя, в котором пролетел пучок ускоренных электронов, составляет ~ 3 тыс. км. Считается, что циклотронное излучение генерируется достаточно низко над уровнем фотосферы в переходной

области хромосфера–корона (2–15 тыс. км), и наиболее достоверные оценки абсолютного значения высоты можно получить только во время солнечных затмений или на основе модельного МП.

В целом, активную область 12371 можно причислить к разряду вспышечно-продуктивных и сформулировать перечень характеристик для АО такого типа:

1. Динамичность развития площади пятен до значения >300 м.д.п.
2. Сложность МП, искривленная нейтральная линия, иногда наличие δ -конфигурации.
3. Явления типа Emerging Flux.
4. Повышенная яркость микроволнового излучения (>0.3 МК) на частоте ~ 15 ГГц.
5. Особенности микроволнового спектра и структуры поляризационного изображения.

В настоящее время оправдываемость прогноза вспышечной активности Солнца составляет (70–75)%. В работе [Bogod et al., 2018] исследуется точность прогнозирования (Ассигасу – АСС) на основе метода КТ-Е, если менять его входные параметры. Анализ прогнозирования таким методом с использованием РАТАН-наблюдений показал [Курочкин и др., 2020], что точность меняется от 50% до 80%, и это верно по отношению как к положительному прогнозу “вспышка будет”, так и отрицательному. Индекс же True skill statistics (TSS) имеет смысл разности оценок вероятностей прогнозов верного (POD – Probability of Detection) события и ложного (POFD – Probability of False Detection) события соответственно. Он является более подходящим для редких событий типа вспышек. Уменьшать вероятность ложного прогнозирования, связанную как с инструментальными особенностями приемной аппаратуры, так и с особенностями обработки больших массивов данных, можно с помощью автоматизированных средств обработки.

Вряд ли в ближайшее время станет возможным предсказывать точный момент единичной вспышки, даже самой мощной. Сейчас, однако, уже имеется достаточно оснований для выявления вспышечно-продуктивных АО [Bogod and Tokhchukova, 2002], но только потенциальной возможности возникновения эруптивных событий. Здесь у микроволнового диапазона есть ценные преимущества, одно из которых – опережающее развитие АО в радиодиапазоне (например, рост радиопотока начинается раньше роста площади пятен [Гельфрейх и др., 1970]), и более высокая контрастность эруптивных событий в нем, по сравнению с проявлением в других частотных диапазонах (см., например, [Nakariakov et al., 2018]). Полученные нами результаты исследования АО 12371 могут быть полезны для модернизации существующих методов и разработки многопараметрического алгоритма прогнозирования.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью изучения и поиска новых параметров, имеющих прогностическое значение, проанализированы наблюдения вспышечно-продуктивной АО NOAA 12371, породившей множественные эруптивные события, и получены следующие характеристики излучения этой активной области:

1. Квазиспокойный источник микроволнового излучения Солнца над АО в коротковолновом диапазоне (~ 2 см) обладает повышенной яркостью 270 КК с опережением на (2–3) дня крупных вспышек (класса М). Иными словами, предлагается новый количественный параметр, позволяющий увеличить долгосрочность прогноза до 7–10 сут.

2. Весь период существования АО на диске Солнца регистрируются эруптивные явления типа Emerging Flux, согласно Parker [1977], являющиеся наиболее прямым следствием подфотосферных динамических процессов, которые проявляются в структуре и напряженности магнитного поля АО, из которого и черпается энергия солнечной вспышки.

3. Оправдываются все 3 параметра классического КТ-Е: значение потока излучения $Flux(3\text{ см}) > 10$ с.е.п, отношение потоков $Flux(3\text{ см})/Flux(10\text{ см}) > 1$. А структура поляризационного изображения при нахождении АО вблизи ПЦМ характеризуется типом Р или Е, что не противоречит и модифицированному критерию Танака–Эноме [Бакунина и др., 2008].

4. Указано, что выявление вспышечно-продуктивных АО обеспечивает только потенциальную возможность вспышки, без точного указания момента, когда она произойдет. Необходимо дальнейшее развитие методов прогнозирования.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем свое глубочайшее уважение и сердечную признательность всему коллективу радиотелескопа РАТАН-600 и научному консорциуму Радиогелиографа Нобеяма (NoRH), обеспечивающих многолетнюю работу этих инструментов и выставляющих свои данные в свободном доступе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, по теме “Исследования динамических характеристик активных образований в атмосфере Солнца в широком диапазоне волн”, регистрационный номер: 0037-2021-0010.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакунина И.А., Смольков Г.Я., Снегирев С.Д. О “геометрических” эффектах в микроволновом излучении активных областей при их прохождении по солнечному диску // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 51. № 8. С. 641–659. 2008.
- Гельфрейх Г.Б., Ахмедов Ш.Б., Боровик В.Н., Гольнев В.Я., Коржавин А.Н., Нагнибеда В.Г., Петерова Н.Г. Исследование локальных источников медленно меняющейся компоненты радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне // Изв. ГАО. № 185. С. 165–182. 1970.
- Гельфрейх Г.Б., Петерова Н.Г., Цветков С.В. О методе прогнозирования солнечных протонных вспышек на БПР на основе критерия Танака–Эноме // Солнечные данные. № 10. С. 89–98. 1989.
- Ихсанова В.Н. О связи радиоизлучения локальных источников в короне со вспышечной активностью групп пятен // Солнечные данные. № 4. С. 100–104. 1971.
- Коробчук О.В., Петерова Н.Г. Спектральные исследования протонно-активных областей на Солнце в сантиметровом диапазоне волн / Радиоизлучение Солнца. Л. Вып. 5. С. 102–113. 1980.
- Курочкин Е.А., Петерова Н.Г., Топчило Н.А., Шендрик А.В. О физическом смысле критерия Танака–Эноме / Тез. Пятнадцатой ежегодной конференции “Физика плазмы в солнечной системе”. Москва, 10–14 февраля 2020 г. М: Изд.-во ИКИ РАН. С. 287. 2020.
- 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. № 216. С. 131–134. 1996.
- Филиппов Б.П. Эруптивные процессы на Солнце. М.: Физматлит, 216 с. 2007.
- Bogod V.M., Svidskiy P.M., Kurochkin E.A., Shendrik A.V., Everstov N.P. A Method of forecasting solar activity based on radio astronomical observations // Astrophys. Bull. V. 73. № 4. P. 478–486. 2018.
<https://doi.org/10.1134/S1990341318040119>
- Bogod V.M., Tokhchukova S.Kh. About microwave emission of flare-productive active regions / Тр. междуна. конф. “Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля Солнца”. ГАО РАН, Пулковое, 17–22 июня 2002 г. С. 63–70. 2002.
- Bogod V.M., Tokhchukova S.Kh. Peculiarities of the Microwave Emission from Active Regions Generating Intense Solar Flares // Astron. Lett. V. 29. № 4. P. 263–273. 2003.
<https://doi.org/10.1134/1.1564858>
- Borisevich T.P., Il'in G.N., Korzhavin A.N., Peterova N.G., Topchilo N.A., Shpitalnaya A.A. The Tanaka-Enome criterion and solar activity in October–November 2003 as observed by the Large Pulkovo Radio Telescope // Cosmic Res. V. 42. № 6. P. 561–570. 2004.
<https://doi.org/10.1007/s10604-005-0003-y>
- Cohen M.N. Magnetoionic mode coupling at high frequencies // Astrophys. J. V. 131. P. 664–680. 1960.
- de Jager C., Svestka Z. 21 May 1980 flare review // Solar Phys. V. 100. P. 435–463. 1985.
- Emmoku S. // Rev. Radio Res. Laboratory. V. 25. № 134. P. 172–176. 1979.
- Énomé Sh., Kakinuma T., Tanaka H. High-resolution observations of solar radio bursts with multi-element compound interferometers at 3.75 and 9.4 GHz // Solar Phys. V. 6. P. 428–441. 1969.
- Korzhavin A.N., Borisevich T.P., Peterova N.G. The flare of October 23, 2003: A comparison of X-ray and radio observations // Solar Syst. Res. V. 40. № 2. P. 163–168. 2006.
<https://doi.org/10.1134/S0038094606020109>
- Lee J., White S.M., Liu C., Kliem B., Masuda S. Magnetic structure of a composite solar microwave burst // Astrophys. J. V. 856. № 1. ID. 70. 2018.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaadbc>
- Nakariakov V.M., Anfinogentov S., Storozhenko A.A., Kurochkin E.A., Bogod V.M., Sharykin I.N., Kaltman T.I. Quasi-periodic pulsations in a Solar Microflare // Astrophys. J. V. 859. № 2. ID. 154. 2018.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabfb9>
- Parker E.N. The origin of solar activity // Annu. Rev. Astron. Astr. V. 15. P. 45–68. 1977.
- Peterova N.G., Korzhavin A.N. Microwave sources with anomalous polarization and high temperature of complex active regions on the Sun // Bull. Spec. Astrophys. Obs. V. 44. P. 71–82. 1998.
- Smolkov G.Ya., Uralov A.M., Bakunina I.A. Radio-heliographic diagnostics of the potential flare productivity of active regions // Geomagn. Aeronomy. V. 49. № 8. P. 1101–1105. 2009.
<https://doi.org/10.1134/S0016793209080106>
- Takakura T. Limiting polarization of solar microwave emission // Publ. Astron. Soc. Japan. V. 13. P. 312–320. 1961.
- Tanaka H., Énomé Sh. The microwave structure of coronal condensations and its relation to proton flares // Solar Phys. V. 40. P. 123–131. 1975.
- Tanaka H., Kakinuma T. The relation between spectrum of slowly varying component of solar radio emission and solar proton event // Rep. Ionos. Space Res. V. 18. P. 32–44. 1964.
- Tokhchukova S.Kh. RATAN-600 radio telescope in the 24th solar activity cycle. IV. Information system for RATAN-600 solar observations // Astrophys. Bull. V. 66. № 3. P. 409–419. 2011.