

УДК 523.985.3

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2018 В. М. Богод^{1,2*}, П. М. Свидский³,
Е. А. Курочкин^{1,2,4}, А. В. Шендрик¹, Н. П. Эверстов¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, 190000 Россия

³Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова, Москва, 129128 Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

Поступила в редакцию 13 января 2018 года; принята в печать 28 сентября 2018 года

Приведены результаты прогнозирования вспышечной активности по данным спектрально-поляризационных наблюдений активных областей (АО) в микроволновом диапазоне на радиотелескопе РАТАН-600 с использованием рентгеновских данных спутника GOES и данных мониторинга. Методика рассчитана на краткосрочный 1–3-дневный прогноз вспышек. Протонные события рассматриваются как часть общей проблемы вспышек. Получение достоверного прогноза представляет собой сложный процесс ввиду многопараметрической и многомерной системы изменения параметров плазмы и многих нелинейных взаимосвязей. Применен модифицированный критерий Танаки–Эноме, используются материалы многолетней базы данных наблюдений. Проведен анализ эффективности прогнозирования в зависимости от пороговых значений критерия. Показано, что качество радиоастрономического прогноза определяется уровнем чувствительности приемной системы на коротких сантиметровых волнах и уровнем активности Солнца.

Ключевые слова: *Солнце: активность — Солнце: радиоизлучение*

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование вспышечной активности (протонных вспышек, в частности) — комплексная задача, требующая анализа разносторонних данных для различных слоев солнечной атмосферы. В развитии активности можно выделить в общем случае несколько стадий. Зарождение активности начинается с процесса всплытия группы пятен на солнечную поверхность. Далее под воздействием вертикальных или горизонтальных перемещений пятен происходит всплытие нового магнитного потока, который может быть зарегистрирован средствами оптических магнитографов. Всплытие нового магнитного потока на уровне нижней короны может также регистрироваться при наблюдениях с высокой чувствительностью слабого поляризованного излучения в широком диапазоне длин радиоволн. Начальная стадия возникновения активности часто имеет длительность около 1–3 дней и прослеживается на радиотелескопах с большой эффективной площадью.

На настоящий момент РАТАН-600 является единственным крупным инструментом рефлекторного типа, где проводятся регулярные наблюдения Солнца. Существующие в мире радиогелиографы на основе интерферометрии имеют пониженную чувствительность по яркостной температуре и предназначены для наблюдений основной взрывной фазы вспышек. Многоволновые наблюдения на РАТАН-600 в микроволновом диапазоне уникальны ввиду широкого перекрытия диапазона частот 1–18 ГГц, высокой чувствительности по потоку излучения, одновременности получения спектрально-поляризационных характеристик [1–3], а поляризационные наблюдения дают возможность измерять параметры плазмы в структурах атмосферы Солнца на уровнях хромосферы и нижней короны в предвспышечной и поствспышечной фазах [4, 5]. Большой интерес для исследователей представляют радиометоды измерения корональных магнитных полей [6, 7], которые основаны на различных механизмах излучения — гирорезонансном (доминирует в локальном источнике), тепловом тормозном, и плазменном. Величинам магнитных полей (менее 2500 Гс), которые

*E-mail: vbog@sao.ru

встречаются в короне над крупными пятнами, соответствует гирорезонансное излучение в диапазоне 1–18 ГГц, поэтому наблюдения на РАТАН-600 позволяют ежедневно публиковать значения корональных магнитных полей в отдельных АО на уровнях нижней короны¹. Еще более популярен другой сайт на сервере СПбФ САО РАН², на котором ведется регулярный прогноз вспышечной активности в информационной системе (ИС) «Прогноз» [8] и создана база данных (БД) многоволновых радионаблюдений на РАТАН-600 всех АО, начиная с 1995 г. по настоящее время. В данной статье мы приводим результаты статистического анализа эффективности прогноза солнечной активности на основе длительных регулярных радионаблюдений. Благодаря сочетанию основных параметров на РАТАН-600 стали доступны спектральные наблюдения ранней стадии зарождения активности, что используется для развития эффективных критериев прогнозирования вспышечной активности.

2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Влияние солнечного излучения на процессы в атмосфере Земли определяется комплексами активности, возникающими на поверхности Солнца в течение 11-летнего цикла. В прогнозировании вспышек наибольшее применение нашли предвспышечные признаки, которые основаны на классификации солнечных пятен по Макинтошу [9]. По проявлению вспышечной активности можно выделить три группы АО:

- 1) Стабильные АО, имеющие монотонные и стабильные спектры интенсивности I и поляризации V .
- 2) Нестабильные АО, которые часто производят слабые вспышки класса C.
- 3) Вспышечно-продуктивные активные области (ВПАО), порождающие мощные вспышки класса M и X в рентгеновском диапазоне, а также протонные события.

Отметим, что мировой центр данных NOAA Space Weather Prediction Center дает трехдневный прогноз, основанный на классификации Макинтоша [9]. При этом вероятность вспышки определяется по степени сходства фотосферных магнитных структур пятен со структурами, которые произвели вспышки раньше. Надежность таких предсказаний вспышечных событий невелика, тем не менее они

используются на ряде веб-сайтов, посвященных мониторингу и прогнозу солнечной активности.

При прогнозировании вспышек радиоастрономические наблюдения обладают рядом преимуществ по сравнению с оптическими. Например, появление активных областей регистрируется в радиодиапазоне раньше, чем в оптическом; наземные радионаблюдения Солнца практически не зависят от погоды; радиоизлучение генерируется в тех слоях солнечной атмосферы, где, согласно современным представлениям о вспышках, зарождаются мощные солнечные вспышки — хромосфере и короне Солнца — и, следовательно, должно быть более чувствительным к предвспышечным изменениям в магнитосфере активной области. Развитие информационных технологий сегодня дает возможность автоматизировать многие рутинные задачи обработки данных.

2.1. Физические основы прогнозирования по радиоастрономическим наблюдениям

При возникновении комплексов активности на уровне фотосферы появляются группы пятен с мощными магнитными полями (около 1000–4500 Гс), которые простираются в верхние слои — хромосферу и разреженную корону с электронной температурой до $T_e = 10^6$ К. Магнитные поля в короне уплотняют плазму, в результате над пятнами генерируется циклотронное излучение, эффективное на низких, 2–4-я, гармониках гирочастоты в широком микроволновом диапазоне. К тому же, это излучение имеет круговую поляризацию (R или L), что позволяет определять величину и знак коронального магнитного поля [10].

Рассмотрим физические процессы, формирующие микроволновый спектр излучения активной области на уровне нижней короны, на примере АО NOAA 12371. На рис. 1 приведен спектр ее излучения в диапазоне длин волн от 1.6 см до 30 см. Следует отметить, что получение таких спектров пока недоступно другим радиотелескопам. рис. 1 демонстрирует процесс деформации спектра АО на предвспышечной стадии. Ход частотной характеристики объясняется свойствами циклотронного излучения на низких гирорезонансных гармониках, а именно, на 2-й гармонике на обыкновенной волне, и на 3-й гармонике гирочастоты на необыкновенной волне. При этом, 2-я гармоника расположена значительно ниже чем 3-я, и имеет на 20–30% большее по величине магнитное поле.

В процессе выхода магнитного поля из хромосферы в корону сначала проявляется верхняя 3-я гармоника, потом 2-я. Этим объясняется подъем спектра на коротких длинах волн в диапазоне от 1.5 см до 6 см. Максимум спектра обусловлен суммарным излучением обеих гармоник. Более

¹<http://www.sao.ru/hq/sun/latest.htm>

²<http://www.spbf.sao.ru/prognoz/db.html>

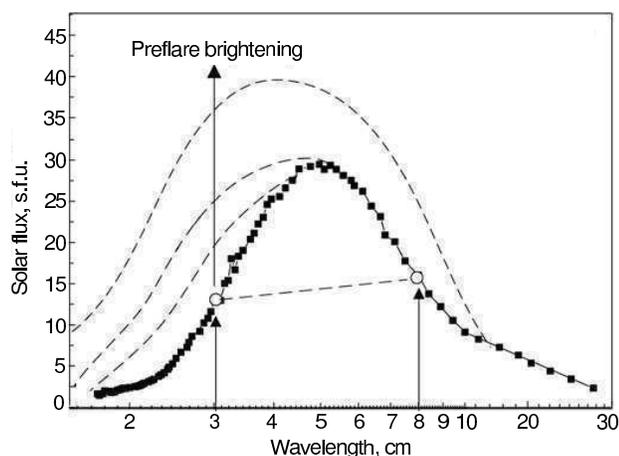


Рис. 1. Типичный спектр радиоизлучения активной области на Солнце на примере АО 12371 для 22 июня 2015 г. Штриховой линией соединены точки в спектре для волн 3 см и 8 см, в которых вычисляются потоки для стандартного критерия Танаки–Эноме. Штриховыми линиями слева приведены кривые, показывающие ход уярчения спектра при предвспышечной ситуации (указан вертикальной линией слева).

высокие гармоники, 4-я и выше, являются оптически прозрачными и не дают заметного вклада в этот спектр. Понижение спектра в области волн большей длины объясняется понижением плотности плазмы солнечной короны при постоянной температуре около 10^6 К.

Анализ вида спектра радиоизлучения является весьма эффективным инструментом для оценки уровня активности АО [11]. При всплытии больших магнитных полей пятен в корону уярчается более коротковолновая часть спектра. Ранее такие эффекты отмечались в работах [12, 13], в которых устанавливалась связь между протонными событиями и интенсивным коротковолновым радиоизлучением. Танака и Эноме [13] установили, что перед мощными протонными событиями излучение в АО на короткой волне 3 см увеличивается более резко, чем на более длинной волне 8 см. Эта ситуация характерна для микроволнового спектра в предвспышечной ситуации, на чем и основано прогнозирование. Статистика наблюдений в 20-м цикле солнечной активности помогла установить пределы критерия, получившего название в честь открывших эффект исследователей.

3. КРИТЕРИЙ ПРОГНОЗА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ТАНАКИ–ЭНОМЕ

Критерием Танаки–Эноме [13] называется набор характеристик локальных источников (ЛИ) АО, отличающейся повышенной вспышечной активностью, в том числе корпускулярной составляющей этой активности (так называемые, протонные

вспышки). Согласно критерию Танаки–Эноме, с большой вероятностью мощные вспышки можно ожидать в тех АО, в которых характеристики ЛИ будут следующими:

- 1) Поток радиоизлучения от АО на длине волны 3 см превышает 10 с.е.п.
- 2) Отношение потока на волне 3 см к потоку на волне 8 см (10 см) превышает 0.8.
- 3) Одномерное распределение поляризованного излучения на волне 3 см имеет специфическую P-,S-конфигурацию.

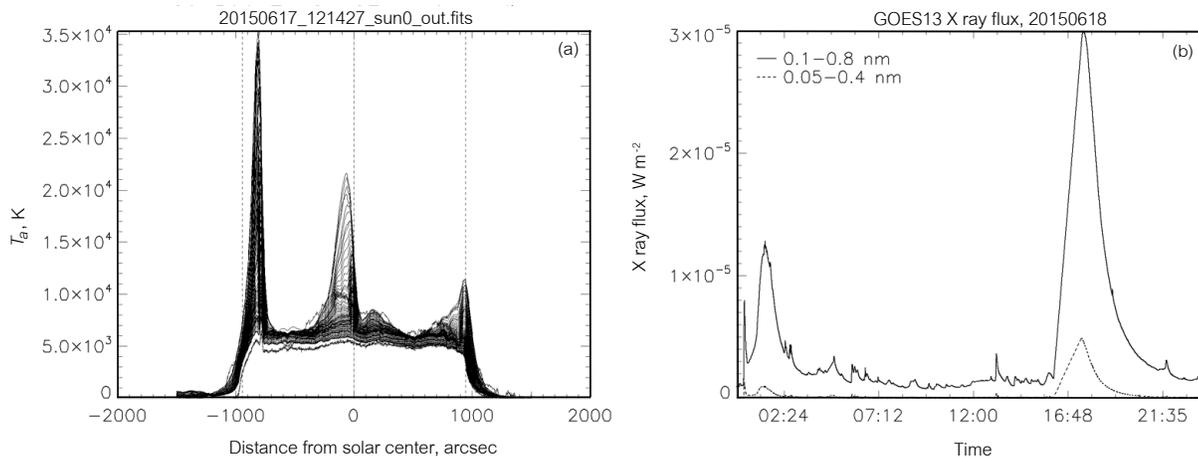
Следует отметить, что Танака и Эноме работали с инструментами низкой чувствительности на двух длинах волн и анализировали очень мощные протонные события на Солнце и события с рентгеновским классом X. В последующих циклах солнечной активности эффективность критерия оказалась менее высокой. Были сделаны попытки его модификации, однако регулярной статистической проверке критерий Танаки–Эноме и его модификации не подвергались. Не использовался этот критерий и для регулярных публикаций прогноза мощных вспышек.

На основе регулярных многоволновых наблюдений Солнца на РАТАН-600 в СПбФ САО РАН создана БД в ИС «Прогноз» за период с 1991 по 2017 гг., в которой проверяется и модифицируется критерий Танаки–Эноме. Удалось значительно улучшить его эффективность благодаря более высокой чувствительности по потоку и более полной выборке АО на диске Солнца. Мы применили идеологию критерия с частичной модификацией по частотному диапазону для прогнозирования менее мощных событий с рентгеновскими классами M и C.

Наблюдения показывают, что спектры поляризованного излучения АО, производящих мощные вспышки, являются немонотонными, в отличие от спектров невспыхивающих АО. Как следует из расчетов, к таким немонотонностям могут приводить неоднородности в высотной структуре АО, например, величины и структуры магнитных полей, а также другие параметры, определяющие плотность и знак поляризованного потока, температурная инверсия, уплотнения на разных высотах и др. [14].

Многочисленные поиски эффективных критериев прогноза вспышек связаны именно с поиском источников первоначальных возмущений и первичного разогрева (токовые слои, сложные дельта-конфигурации магнитного поля, пекулярные радиоисточники, высокие яркостные температуры, аномалии в поляризованном радиоизлучении и др.) [10, 15, 16].

Созданная база многоволновых данных позволяет проверять различные модификации критерия



NOAA ARs: 2365 2367 2369 2370 2371

Time	az	NOAA AR	x pos	y pos	flux 3cm	flux 3cm corr	flux 10cm	flux 10cm corr	Pol	location	area	prognosis	spi	x1	x2	dx
07:02:37	+30	2367_2369	62	-6.2	3.50	4.38	5.90	5.90	S	S20W07	340	negative	0.00	-80	138	218
07:02:37	+30	2371	-588	7.5	34.20	47.50	40.40	40.40	S	N12E53	520	positive	0.00	-945	-440	505
07:02:37	+30		766	0.0	14.40	14.40	16.40	16.40	S		0	negative	0.00	710	889	179
07:11:35	+28	2366	807	-1.5	21.40	21.66	21.40	21.40	S	N16W85	0	positive	0.00	718	925	207
07:11:35	+28	2367_2369	116	-6.2	3.70	4.62	5.50	5.50	S	S20W07	340	negative	0.00	-29	187	216
07:11:35	+28	2371	-555	7.3	17.50	23.91	19.50	19.50	S	N12E53	520	positive	0.00	-719	-455	264
07:11:35	+28		-768	0.0	13.60	13.60	13.70	13.70	E		0	negative	0.00	-946	-742	204

Рис. 2. Пример прогноза протонного события в активной области NOAA 12371. Слева приведены многоволновые сканы диска Солнца в диапазоне от 3 до 17.6 ГГц для наблюдения 17.06.2015. Справа — демонстрация протонного события 18 июня 2015 г. активной области NOAA 12371 по данным спутника GOES 13. Под сканами приведена таблица параметров всех источников на диске Солнца, которые автоматически вычисляются на сайте <http://www.spbf.sao.ru/prognoz/db.html>. Наиболее темным цветом выделены положительные результаты прогноза.

прогнозирования по изменению частот, уровням потока излучения, наклону спектра, степени поляризации и др. Пример работы БД по адресу http://www.spbf.sao.ru/cgi-bin/ion-p?page=rat_search_ion в СПбФ САО РАН для случая положительного прогноза протонного события приведен на рис. 2.

4. ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ

Одним из назначений созданной на сервере СПбФ САО РАН ИС «Прогноз» [8] является формирование БД наблюдений Солнца на РАТАН-600. Во время наблюдений данные Солнечного Спектрально-Поляризационного Комплекса (ССПК) РАТАН-600 [17, 18] во время наблюдений передаются на сервер регистрации, расположенный непосредственно в приемной кабине радиотелескопа. Здесь данные записываются в формате `raw` (каждое наблюдение — порядка 60 МБ), и далее происходит процедура конвертации с помощью программы `arm2fits` в

`fits`-формат, широко применяемый при астрономических наблюдениях. Этот формат является первичным и поступает в архив наблюдений. Для упрощения транспортировки файлов на сервера обработки используется сглаживание по 30 точкам, при этом размер файла уменьшается до 2 МБ. Для большинства исследовательских задач такое сглаживание не ухудшает качества данных. Далее данные поступают в сеть Интернет на сервер СПбФ САО РАН и доступны профессиональным пользователям, в среднем, через 4 минуты после завершения наблюдений. Для реализации регулярного скачивания `fits`-файлов с помощью программы `wget` в ИС «Прогноз» в программе `Сноп` на платформе ОС на ядре `Linux` заведено расписание, файлы в формате `raw` из-за большого размера скачиваются во вне рабочее время.

Дальнейшая обработка данных проводится в ИС «Прогноз». `Fits`-файлы могут быть открыты на сервере программой `IDL` (Interactive Data Language) с помощью подпрограммы (англ. routine) `mrdfits`, вследствие чего получается трехмерный массив, включающий координату x ,

тип поляризации (параметры Стокса I и V или R и L) и частоту. Типичный массив одного скана представляет собой массив из $2000 \times 2 \times 80$ точек. После этого осуществляются две процедуры — нахождение источников на скане и отождествление их с общепринятой всемирной нумерацией активных областей Space Weather Prediction Center (SWPC) National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Для автоматической реализации этих процедур создано приложение `db_addfluxes`, при этом используется метод вписывания гауссианы с помощью подпрограммы `gaussfit`, которая формирует кривую гауссовой формы в виде:

$$f(x) = A_0 e^{(-z^2/2)} + A_3 + A_4 x + A_5 x^2, \quad (1)$$

где $z = (x - A_1)/A_2$, A_0 , A_1 и A_2 — соответственно высота, центр и ширина гауссианы, а A_3 , A_4 и A_5 — постоянный, линейный и квадратичный члены.

По параметрам этой гауссианы рассчитываются параметры ЛИ для дальнейшего занесения в БД (положение на оси x , поток радиоизлучения, размеры ЛИ и др.). Запись параметров ЛИ в БД осуществляется отдельной программой на языке Perl, которой передаются все измеренные параметры радиоисточника.

Для отождествления ЛИ с номерами SWPC NOAA используется разработанная программа на IDL `db_pos2noaa_spectr`. Положение АО на диске Солнца с учётом позиционного угла сравнивается с положением ЛИ на скане. В случае совпадения с приемлемой точностью (до 10%), в БД данному ЛИ присваивается соответствующий номер NOAA. В случае, если в ножеобразную диаграмму направленности антенной системы «Южный сектор с Плоским отражателем» РАТАН-600 попадает несколько АО [8], то в запись данных они вносятся через символ «_», что допустимо, поскольку информацию о том, будет или нет вспышка, можно перенести не на одну какую-то конкретную АО, а на группу АО с соответствующим замечанием.

После того, как найдены все ЛИ и они отождествлены с АО, в БД добавляется информация о вспышках (рис. 2). Для этого используется программа (на Perl), которая обращается к базе данных Solar and Geophysical Activity Summary (SGAS) SWPC. В ней в текстовом виде (ASCII-файлы) имеется подробная информация о вспышках (номер АО NOAA, класс вспышки, время ее начала, максимума и завершения, положение на диске Солнца и др.). Эта информация также добавляется в БД к соответствующей записи отождествленных ЛИ с номерами NOAA.

Таким образом создается логическая модель БД в ИС «Прогноз» на сервере СПбФ САО. В ходе

заполнения БД формируется список АО с ЛИ на многоволновых сканах Солнца и их характеристиками в радиодиапазоне с сопутствующей информацией о вспышках в соответствующих АО в рентгеновском диапазоне. На основе полученных данных проводится первичная оценка прогнозирования по параметрам ЛИ с различными граничными условиями входных параметров, сравнивая результат прогнозирования с действительно произошедшими событиями в рентгеновском диапазоне (по SGAS).

Для оценки эффективности применяется ещё одна программа на IDL, которая, используя данные о потоках радиоизлучения и информацию о происшедших рентгеновских вспышках, производит расчёт статистических оценок эффективности радиоастрономического прогноза.

5. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРИТЕРИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Для вычисления эффективности прогнозов применяются различные индексы. Нами были использованы ACC (Accuracy) и TSS (True Skill Statistic) [19]. Для их вычислений приняты следующие обозначения происшедших событий:

- 1) TP = True Positive (верный положительный прогноз, вспышка произойдет).
- 2) TN = True Negative (прогноз негативного события, вспышки не будет).
- 3) FP = False Positive (ошибка положительного прогноза).
- 4) FN = False Negative (ошибка прогноза негативного события).

Индекс ACC выражает отношение количества успешных прогнозов (положительных и негативных) к числу всех прогнозов (вместе с ошибочными):

$$ACC = \frac{\text{верный прогноз}}{\text{все прогнозы}} \quad (2)$$

или

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}.$$

Он меняется от 0 до 1.

К сожалению, несмотря на прозрачный смысл индекса ACC , для случая редких событий, каковыми являются мощные вспышки, он малоприменим. К примеру, если событие имело место в пяти случаях из ста возможных, то такой прогноз, как «событие не произойдет никогда» даст результат 95% успешности. Таким образом индекс ACC отображает процент верных прогнозов и менее предназначен для оценки отрицательных прогнозов.

Таблица сопряженности наблюдений и прогноза

Результат наблюдений	Прогноз вспышки	
	Будет	Не будет
Вспышка произошла	TP	FN
Вспышки не было	FP	TN

Индекс 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 и вычисляется следующим образом:

$$TSS = POD - POFD$$

$$TSS = \frac{TP}{TP + FN} - \frac{FP}{FP + TN} \quad (3)$$

Была применена таблица сопряженности наблюдений и прогноза.

Вычисленные по наблюдениям и прогнозируемые значения TP , TN , FP и FN для каждой АО заносятся в таблицу для формирования базы статистических данных. Для оценки качества прогнозирования используются индексы ACC и TSS , которые рассматриваются как функции двух переменных B и C , применяемые в критерии Танаки–Эноме. Здесь принято: $B = F_{3\text{ см}}^{\min}(\lambda)$ — минимальный поток излучения от АО на короткой длине волны, $C = F_{3\text{ см}}/F_{10\text{ см}}$ — отношение потока излучения на волне 3 см к потоку на волне 10 см.

В нашем случае волна 8 см была заменена на 10 см, что, как показали наблюдения, не ухудшило применяемый критерий. Признак наличия поляризованного излучения дополнительно указывает на принадлежность АО к вспышечно-продуктивным активным областям ВПАО.

Таким образом, предметом исследований является поведение функций двух переменных для индексов: $ACC = ACC(B, C)$ и $TSS = TSS(B, C)$.

Мы провели расчеты индексов $ACC(B, C)$ для одногодичного (01.01.2014–01.01.2015 г.) и двухгодичного (01.01.2015–01.01.2017 г.) интервалов, их результаты представлены на рис. 3а и 3б соответственно.

Расчеты функции $TSS(B, C)$ по наблюдениям для тех же интервалов времени представлены соответственно на рис. 4а и рис. 4б.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА

Исследование поведения функций двух переменных для индексов $ACC = ACC(B, C)$ и $TSS = TSS(B, C)$, представленного на рис. 3 и 4, показывает следующие свойства радиоастрономического прогноза по наблюдениям на РАТАН-600 с применением критерия Танаки–Эноме:

1) Высокие значения индекса ACC , достигающие значений вероятности прогноза около 80%. Рост ACC с ростом фактора C указывает на прямую зависимость вспышечной активности от роста излучения на коротких волнах. При больших значениях B крутизна характеристик ACC снижается.

2) Достаточно высокие значения индекса TSS для измерений в двухгодичном интервале, до 45%. Обращает на себя внимание резкий спад индекса TSS с ростом отношения потоков излучения на двух волнах $C = F_{3\text{ см}}/F_{10\text{ см}}$ при значениях свыше 0.8.

3) Эти результаты указывают, с одной стороны, на высокое качество наблюдений по ACC , с другой, на значительное падение TSS при больших значениях параметра для всех значений фактора отсечки $B_{\min} = 4-11$ s.f.u.

Рассмотрим причины такого поведения TSS .

На рис. 5, где приведена зависимость TSS от минимального уровня потока B на волне 3 см, можно проследить, как влияет на прогноз уровень минимального потока излучения на короткой волне. Здесь фактор B выполняет роль отсечки АО от установленного уровня. Рост TSS в диапазоне значений $B = 5-10$ s.f.u. для малых значений $C = 0.3-0.6$ указывает на увеличение количества прогнозируемых вспышек в АО с изменениями потока излучения на короткой волне 3 см. Заметим, что для значений $B_{\min} > 1.0$ значение TSS резко снижается, указывая на уменьшение числа прогнозируемых вспышек, в соответствии с рис. 5, на котором показан порог ограничения критерия Танаки–Эноме при значении $C > 0.8$. Этим объясняется нестабильность при использовании критерия Танаки–Эноме для прогнозирования в различных по активности солнечных циклах.

На рис. 6 приведен ход кривых индекса TSS , вычисленного согласно (3), и его составляющих POD и $POFD$ для всех активных областей (6515 событий) на Солнце в интервале наблюдений с 1 января 2015 г. по 1 января 2017 г.

Можно разделить вероятности обнаружения вспышки POD и вероятности ошибки обнаружения вспышки по всем ложным событиям $POFD$. На рис. 6 видно, что вероятность обнаружения вспышки POD довольно высока при значениях

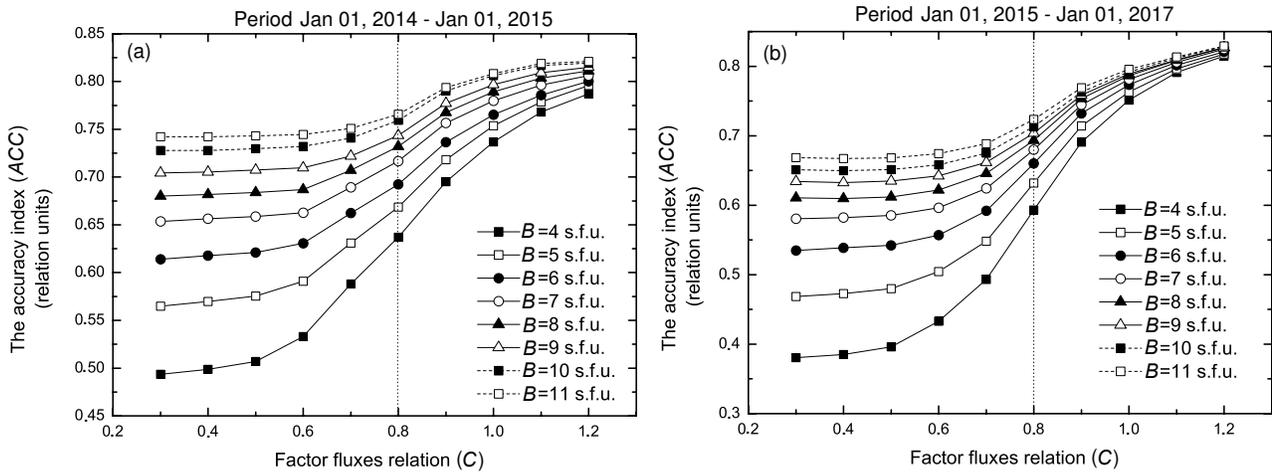


Рис. 3. Изменения индекса *ACC* (а) для наблюдений радиоизлучения Солнца на интервале в год: с 1 января 2014 г. по 1 января 2015 г. (количество обработанных случаев — 10792) и (б) для 6515 случаев в двухгодичном интервале с 1 января 2015 г. по 1 января 2017 г. Показан рост чувствительности индекса *ACC* с ростом *C*, т.е. отношения величин потока излучения на короткой волне 3 см к потоку излучения на длинной волне 10 см для разных значений минимального потока *B*. Пунктиром указано ограничение по критерию Танаки–Эноме.

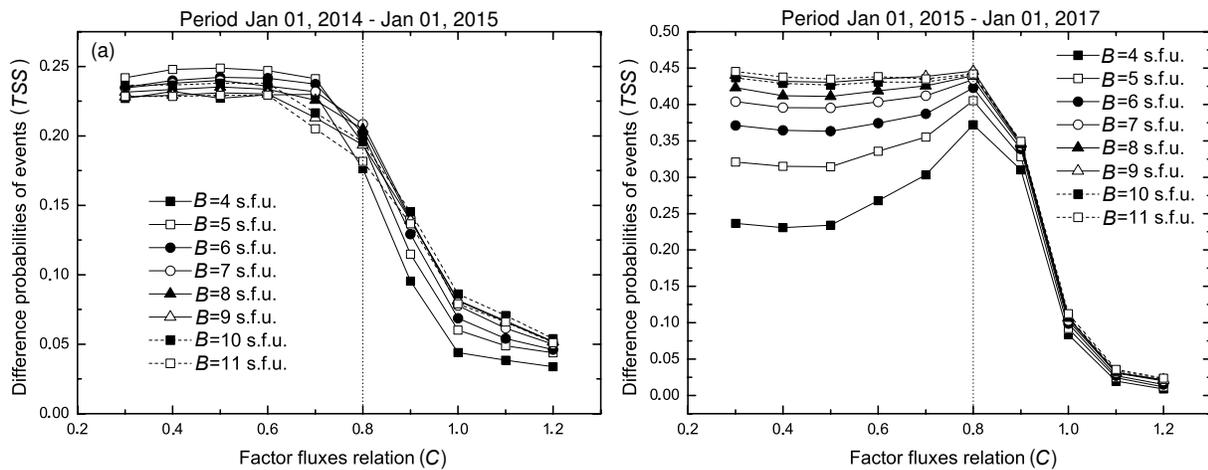


Рис. 4. Изменения индекса *TSS* (а) для годовичного интервала наблюдений радиоизлучения Солнца с 1 января 2014 г. по 1 января 2015 г. (10792 случаев) и (б) для 6515 обработанных случаев за два года, с 1 января 2015 г. по 1 января 2017 г. Отмечается резкий спад индекса в диапазоне выше 0.8. Постоянные значения *TSS* сохраняются в диапазоне значений минимальных потоков для $B = 8–11$ s.f.u. Пунктир указывает ограничения по критерию Танаки–Эноме.

и даже показывает рост с уменьшением фактора *C*, следовательно фактор *C* представляет собой уровень отсечки вспышечных событий, предвспышечное уярчение которых происходило при значениях $C = F_3 / F_{10} = 0.3–0.8$. В дальнейшем при больших значениях $C > 0.8$ учитываются только области с большим уровнем минимального потока, что резко уменьшает значение *POD*. Фактор *POFD* как вероятность ошибки обнаружения вспышки показывает подобный ход кривой, но на меньшем уровне значений.

Возможные причины ошибок:

1) Неточное автоматизированное отождествление

активных областей на диске Солнца и на радиоскане Солнца, что влияет на число неучтенных событий;

2) Совпадение (двух или более) АО в одномерной вертикальной диаграмме радиотелескопа;

3) Ошибки автоматического определения границ АО — ошибки идентификации АО с NOAA AR при положении АО на краю диска, где точность снижается из-за угла проекции;

4) Проведение радионаблюдений в ходе активного события (всплеска, коронального выброса масс и др.).

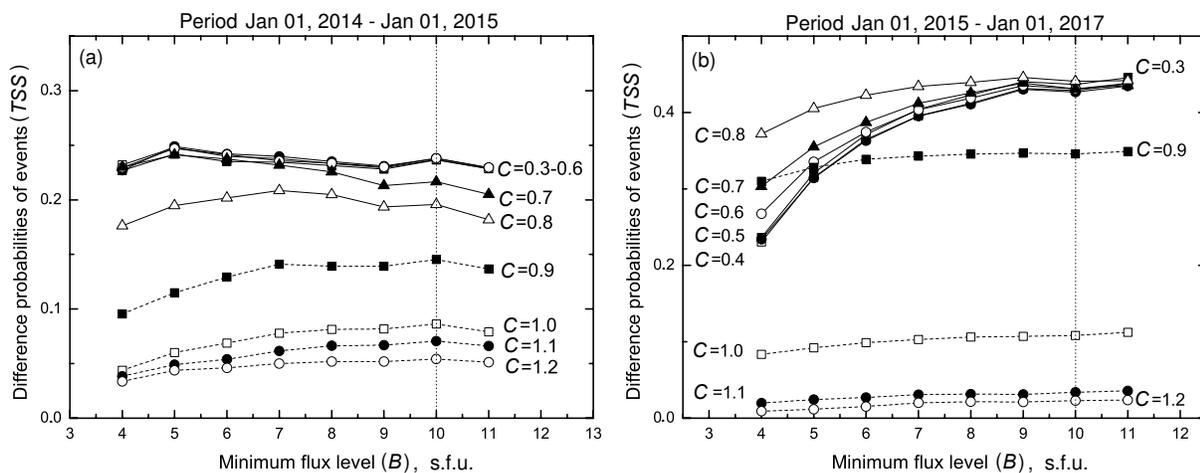


Рис. 5. Связь индекса TSS с уровнем минимального потока на волне 3 см для наблюдений в одногодичном (а) и двухгодичном (б) интервалах.

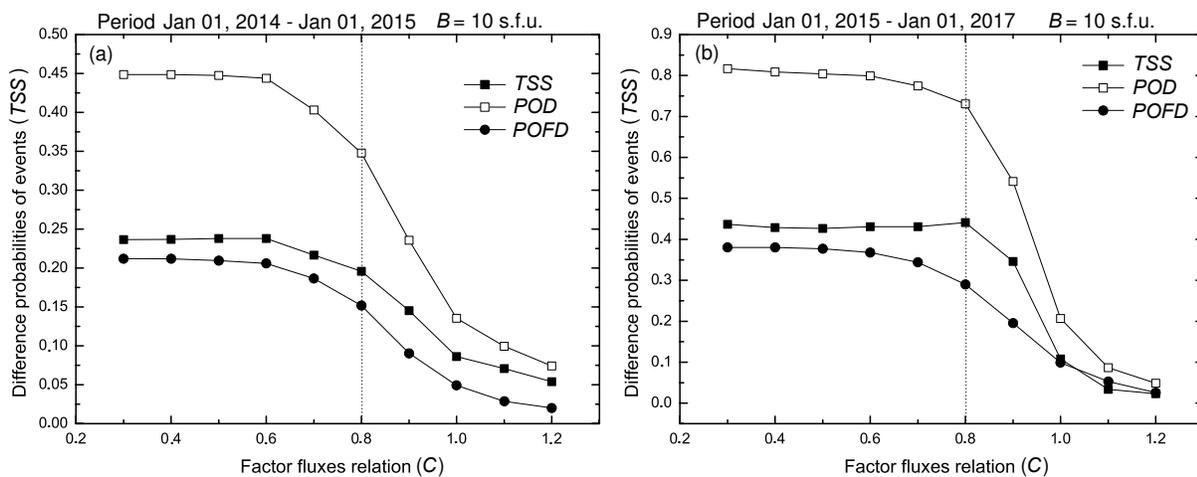


Рис. 6. Зависимость индекса TSS и его составляющих POD и $POFD$ от параметра C при фиксированном значении параметра $B = 10$ s.f.u. по данным наблюдений радиоизлучения Солнца (а) за одногодичный интервал и (б) за двухгодичный. Пунктир указывает на уровень C по критерию Танаки–Эноме.

Для данных наблюдений на интервале в один год получено:

ACC — 66–80%, TSS — 13–24%, POD — 13–56%, $POFD$ — 5–56%;

а для двухгодичного интервала:

ACC — 58–79%, TSS — 10–43%, POD — 20–86%, $POFD$ — 9–46%.

Такие результаты указывают на существование большого количества возможных модифицированных прогнозов при выборе параметров B и C . С другой стороны, есть указание на существование влияния хода активности 11-летнего цикла на оценку достоверности критерия прогнозирования. В то же время поиск оптимального критерия возможен при оптимизации выбора частот для сравнения потоков радиоизлучения. Весьма возможно,

что на уменьшение величины POD влияют другие версии предвспышечного проявления, не совпадающие с принятыми в данной работе расчетами [20].

7. ВЫВОДЫ

1. Исследованы зависимости статистических критериев ACC (точность) и TSS (ошибки) для всех значений фактора отсечки $B_{\min} = 4–11$ s.f.u. и от отношения потоков излучения на двух волнах $C = F_3 / F_{10}$.

2. Продемонстрировано, что существуют резервы повышения достоверности прогноза как за счет уменьшения B_{\min} , так и за счет изменения длины волны.

3. Для увеличения результативности процесса отождествления АО по радио- и оптическим дан-

ным необходимо повышать точность автоматического отождествления и чувствительность метода на коротких волнах.

4. Результаты проведенного исследования показывают, что критерий Танаки—Эноме по-разному работает в разных по длительности интервалах (на примере годового и двухгодичного набора данных). Это указывает также на различную его эффективность на протяжении всего 11-летнего цикла и от цикла к циклу.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке программы Президиума РАН №7 и базовой темы №01201450617.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. M. Bogod, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **70**, 1707 (2006).
2. V. M. Bogod, Astrophysical Bulletin **66**, 190 (2011).
3. V. M. Bogod and S. K. Tokhchukova, Cosmic Research **44**, 506 (2006).
4. M. A. Livshits, A. M. Urnov, F. F. Goryaev, et al., Astronomy Reports **55**, 918 (2011).
5. V. M. Bogod and L. V. Yasnov, Solar Phys. **255**, 253 (2009).
6. S. B. Akhmedov, G. B. Gelfreikh, V. M. Bogod, and A. N. Korzhavin, Solar Phys. **79**, 41 (1982).
7. V. M. Bogod and G. B. Gelfreikh, Solar Phys. **67**, 29 (1980).
8. S. K. Tokhchukova, Astrophysical Bulletin **66**, 379 (2011).
9. P. S. McIntosh, Solar Phys. **125**, 251 (1990).
10. V. M. Bogod and S. K. Tokhchukova, Astronomy Letters **29**, 263 (2003).
11. L. V. Yasnov, T. I. Kal'tman, and V. M. Bogod, Astronomy Reports **55**, 82 (2011).
12. T. Tanaka and T. Kakinuma, Rep. Ionos. Space Res. Japan **18**, 32 (1964).
13. H. Tanaka and S. Enome, Solar Phys. **40**, 123 (1975).
14. T. I. Kaltman, V. M. Bogod, A. G. Stupishin, and L. V. Yasnov, Geomagnetism and Aeronomy **53**, 1030 (2013).
15. A. T. Altyntsev, V. I. Krasov, and V. M. Tomozov, Solar Phys. **55**, 69 (1977).
16. A. A. Altyntsev, G. D. Fleishman, S. V. Lesovoi, and N. S. Meshalkina, Astrophys. J. **758**, 138 (2012).
17. V. M. Bogod, A. M. Alesin, and A. A. Pervakov, Astrophysical Bulletin **66**, 205 (2011).
18. S. V. Baldin and V. I. Garaimov, Astrophysical Bulletin **66**, 371 (2011).
19. D. S. Bloomfield, P. A. Higgins, R. T. J. McAteer, and P. T. Gallagher, Astrophys. J. **747**, L41 (2012).
20. J. Jing, C. Tan, Y. Yuan, et al., Astrophys. J. **713**, 440 (2010).

A Method of Forecasting Solar Activity Based on Radio Astronomical Observations

V. M. Bogod, P. M. Svidskiy, E. A. Kurochkin, A. V. Shendrik, and N. P. Everstov

We present the results of forecasting flare activity based on the data from microwave spectro-polarimetric observations of active regions (ARs) obtained with the RATAN-600 radio telescope and the X-ray data from the GOES satellite as well as monitoring data. The method is designed for short-term (1–3-days) flare forecasts. Proton events are considered as part of the general flare problem. Obtaining a reliable forecast is a difficult process in view of the multi-parameter and multi-dimensional system of plasma parameter variations and multiple non-linear interconnections. We used a modified Tanaka–Enome criterion, as well as a database of observational material collected over many years. The forecasting efficiency was analyzed depending on the threshold values of the criterion. We show that the quality of the radio astronomical forecast is determined by the level of sensitivity of the detector at short centimeter wavelengths and by the solar activity level.

Keywords: *Sun: activity—Sun: radio radiation*