

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 228

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ МЕТОДИКИ
КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОТОННЫХ ВСПЫШЕК
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ
СОЛНЕЧНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Семенова С.В., Фридман В.М., Шейнер О.А.

Аверьянихина Е.А., Паупере М.Э.

Семенова С.В., Фридман В.М., Шейнер О.А.,
Аверьянихина Е.А.⁺, Паупере М.Э.⁺

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ МЕТОДИКИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНО-
ЗИРОВАНИЯ ПРОТОННЫХ ВСПЫШЕК ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ПУЛЬ-
САЦИЙ СОЛНЕЧНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ. // Препринт № 228. - Горький,
НИРФИ. - 1987. - с.

УДК 523.164.32

На основе статистической обработки материалов наблюдений
долгопериодных пульсаций солнечного радиоизлучения рассматрива-
ются возможности создания алгоритма краткосрочного прогноза
солнечных протонных вспышек и эффективности его использования.

⁺Сотрудники Радиоастрофизической обсерватории АН ЛатвССР.

Известны методы, с помощью которых прогнозируют солнечные вспышки с вероятностью 70–80% /1/. Прогноз отсутствия вспышек достигает вероятности 90–95% /2, 3/. Для повышения оправдываемости прогноза вспышек наряду с совершенствованием известных методов прогнозирования идет поиск новых прогностических параметров.

Впервые вопрос о возможности использования данных долгопериодных с $T \geq 20$ минут пульсаций солнечного радиоизлучения (дпр) для целей прогнозирования протонных вспышек на Солнце был поднят в работе /4/, посвященной активным событиям августа 1972 г. Начальные исследования эффекта возрастания амплитуды долгопериодных пульсаций радиоизлучения перед семью мощными вспышками были обобщены в /5, 6/. По инициативе профессора М.М.Кобринина изучение обнаруженного эффекта на регулярной основе было поставлено с 1977 г. в НИРФИ (в сантиметровом диапазоне длин волн) /7, 8/ и несколько позднее в РО АН Латв.ССР (в дециметровом диапазоне) /9/. В работе /7/ была предпринята первая попытка сформулировать методические основы прогнозирования мощных вспышек по динамическим характеристикам дпр.

Разработка обоснованных критериев и принципов методики прогнозирования стала возможна после статистических исследований наблюдаемого эффекта увеличения амплитуды дпр за 1–2 суток перед вспышками по материалам наблюдений 1970–1983 гг. /10/. Имеются работы, связывающие геоэффективность вспышек с характеристиками предшествующих им долгопериодных пульсаций радиоизлучения. Так, в /10/ сделана попытка связать характеристики пульсаций с количеством регистрируемых протонов от вспышки; длительность интервала существования пульсаций и их амплитуды в зависимости от параметров вспышек исследовались в дециметровом диапазоне длин волн /11/. По современным представлениям увеличение амплитуды дпр перед вспышками отражает процессы накопления энергии в центрах активности и сопровождающие эти процессы различного рода неустойчивости /12/. Тем не менее, вопросы построения физических моделей и динамики процессов в активных областях, приводящих к указанным явлениям, остаются мало изученными.

Предлагаемое исследование содержит результаты анализа закономерностей, характеризующих связь параметров дпр Солнца с последующими геоэффективными вспышками. Под долгопериодными пульсациями будем понимать пульсации радиоизлучения с характерными пе-

риодами $T \geq 20$ мин. в сантиметровом диапазоне и $T \approx 40$ мин. в дециметровом диапазоне длин волн; геосинхронными солнечными вспышками считать такие, после которых возможен приход к орбите Земли потока протонов с максимальной интенсивностью $I(E > 5 \text{ МэВ}) \geq 1 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1}$. Остановимся подробнее на основных положениях анализа.

I. Для получения закономерностей использовались данные наблюдений наклона спектра радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне и интенсивности радиоизлучения в дециметровом диапазоне длин волн.

Экспериментальной базой для получения данных являлись:

а) радиотелескоп РТ-2Ф НИРФИ, регистрирующий интенсивность и наклон спектра радиоизлучения Солнца в трехсантиметровом диапазоне длин волн. Наклон спектра ΔI определяется как $\Delta I(\Delta f) = I(f_1) - I(f_2)$, где $I(f_1)$, $I(f_2)$ - интенсивность радиоизлучения на частотах f_1 и f_2 соответственно, $\Delta f = f_1 - f_2 \ll f_0 = (f_1 + f_2)/2$. В исследованиях использовались данные, полученные в отдельные периоды 1970, 1972, 1978-80, 1983, 1984 гг. Описание радиотелескопа содержится в /7/.

б) радиотелескоп РТ-10 РО АН Латв.ССР, предназначенный для регистрации интенсивности I солнечного радиоизлучения на частотах 755 и 612 МГц. В исследованиях использовались данные за 1979-1984 гг. Описание радиотелескопа содержится в /13/.

Вопросы методики наблюдений, используемых длин волн, оптимального разнеса частот Δf в канале наклона спектра и оптимальной полосы анализа изложены в /7/. Ниже приводятся таблицы с перечнем протонных событий, вошедших в основу рассматриваемых закономерностей: табл. 1 - для сантиметрового радиоизлучения, табл. 2 - для дециметрового радиоизлучения.

Полученный в сантиметровом и дециметровом диапазонах материал обрабатывался следующим образом.

I. Просмотр лент на наличие импульсных всплесков. Всплески с длительностью менее трех минут из записи исключались. Записи с мощными всплесками обрабатывались раздельно до и после всплеска. При наличии большого числа всплесков оценивался их возможный вклад в среднюю амплитуду пульсаций \bar{A}_{ii} , определяемую как $\bar{A}_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i$, где A_i - единичная амплитуда долгопериодных пульсаций, N - число пульсаций за сеанс наблюдений (см.

рис. 1). При существенном влиянии всплесков на величину \bar{A}_H запись из обработки исключалась.

Таблица 1

Список протонных событий, вошедших в анализ дпр сантиметрового радиоизлучения

№ п/п	Д а т а	Тип прогноза	
		$\Delta f = 200$ МГц	$\Delta f = 700$ МГц
1.	06.03.70	да-да	-
2.	07.03.70	да-да	-
3.	02.08.72	да-да	-
4.	04.08.72	да-да	-
5.	07.08.72	да-да	-
6.	13.02.78	-	да-да
7.	23.09.78	-	нет-да
8.	13.08.79	-	да-да
9.	14.08.79	-	да-да
10.	18.08.79	-	да-да
11.	14.09.79	-	да-да
12.	03.04.80	да-да	да-да
13.	14.10.80	нет-да	-
14.	15.10.80	нет-да	-

Таблица 2

Список протонных событий, вошедших в анализ дпр дециметрового радиоизлучения

№ п/п	Д а т а	Тип прогноза
1	2	3
1.	04.06.79	да-да
2.	05.06.79	да-да
3.	13.08.79	да-да

I	2	3
4.	14.08.79	да-да
5.	18.08.79	да-да
6.	20.08.79	да-да
7.	26.08.79	да-да
8.	07.06.80	да-да
9.	21.06.80	да-да
10.	29.06.80	нет-да
11.	17.07.80	да-да
12.	06.08.80	нет-да
13.	19.07.81	да-да
14.	20.07.81	да-да
15.	03.06.81	да-да
16.	04.06.82	да-да
17.	05.06.82	да-да
18.	06.06.82	да-да
19.	08.07.82	нет-да
20.	09.07.82	да-да
21.	17.07.82	да-да
22.	22.07.82	да-да
23.	15.05.83	да-да
24.	12.06.83	да-да
25.	22.05.84	нет-да

2. Производился съём информации от произвольно выбранного уровня с дискретностью $\Delta t \leq 30$ сек.

3. Алгоритм обработки на ЭВМ можно представить следующим образом (рис. 2).

4. Следующий шаг обработки - определение максимальных амплитуд долгопериодных пульсаций A_i :

а) для сантиметрового диапазона с $T \geq 20$ мин. в реализации длительность не менее трех часов,

б) для дециметрового диапазона с $T \geq 40$ мин.

Далее по сумме A_i находилась A_n .

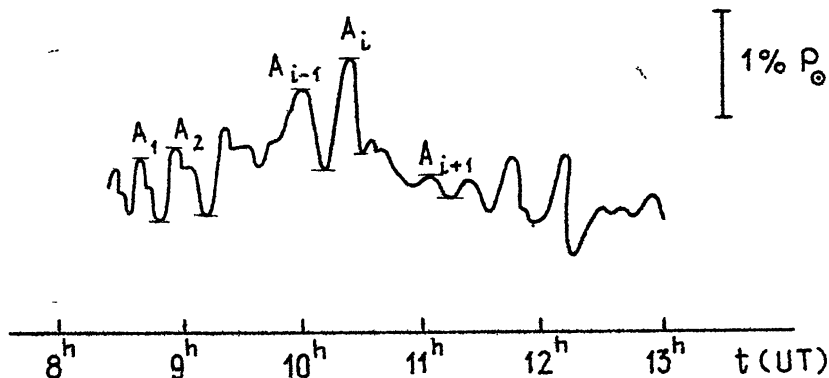


Рис. 1

II. При исследовании закономерностей поведения амплитуд долгопериодных пульсаций \bar{A}_n важен исходный уровень амплитуд дпр. После статистического анализа имеющегося наблюдательного материала за период "спокойного" и "относительно спокойного" Солнца (Приложение) установлено:

а) в дальнейшем исследовании предвспышечного радиоизлучения в сантиметровом диапазоне должны рассматриваться только данные, относящиеся к каналу наклона спектра ΔI_1 и ΔI_2 , в соответствии с выводами о их независимости от погодных условий и слабой вспышечной активности (ΔI_1 - наклон спектра при $\Delta f_1 = 200$ МГц, ΔI_2 - при $\Delta f_2 = 700$ МГц);

б) средняя амплитуда долгопериодных пульсаций наклона спектра радиоизлучения для периодов "спокойного" Солнца при наблюдениях на РТ-2Ф НИРФИ составляет $0,15\% P_{\odot}$; P_{\odot} - поток радиоизлучения Солнца на частоте $f_0 \approx 9300$ МГц;

в) средняя амплитуда долгопериодных пульсаций в интенсивности для периодов "спокойного" Солнца при наблюдениях на РТ-10 РО АН Латв.ССР на $f = 755$ МГц определена равной $0,3\% P_{\odot}$; P_{\odot} - поток радиоизлучения Солнца на данной частоте.

Заметим, что в величины средних амплитуд дпр входит составляющая, определяемая шумовыми характеристиками используемой приемной аппаратуры. В частности, флуктуационный порог чувствительнос-

ти радиотелескопа РТ-2Ф составлял $0,15\% \rho_{\odot}$, что равно величине исходного уровня дпр для периодов "спокойного" Солнца.

III. Для выяснения возможности использования в качестве прогностического параметра амплитуды дпр \bar{A}_n необходимо доказать статистическую достоверность факта увеличения \bar{A}_n перед протонными вспышками.

Рассматривался наблюдательный материал за интервалы времени, составляющие несколько дней до и после вспышки. За нулевой день принят день, когда произошла вспышка, и для каждой выборки $\Delta I_1, \Delta I_2, I$ методом наложения эпох получена среднестатистическая зависимость \bar{A}_n (сутки). За каждый i -й день до и после вспышки оценены средние значения \bar{A}_n , дисперсия, доверительные интервалы. Результаты вычислений вынесены в табл. 3 (для сантиметрового радиослучения) и в табл. 4 (для дециметрового радиослучения).

Как видно из таблиц, доверительные интервалы имеют большие значения, сравнимые с величинами \bar{A}_n . Для проверки достоверности эффекта возрастания амплитуды дпр перед вспышкой для каждой выборки $\Delta I_1, \Delta I_2, I$ были сформированы подвыборки:

- а) средние значения \bar{A}_n за 3-4 дня до вспышки,
- б) - " - " - за 1-2 дня до вспышки,
- в) - " - " - за 1-2 дня после вспышки.

Используя t - критерий /16/ (по схеме, приведенной в Приложении), показано, что расхождение средних значений \bar{A}_n этих подвыборок является статистически значимым:

- а) с 5-процентным уровнем значимости для канала $\Delta I_1 (\Delta f_1 = 200 \text{ МГц})$,
- б) с 10-процентным уровнем значимости для канала $\Delta I_2 (\Delta f_2 = 700 \text{ МГц})$,
- в) с 5-процентным уровнем значимости для канала $I (\Delta f = 755 \text{ МГц})$.

С целью рассмотрения более однородного (по степени геоэффективности вспышек) материала наблюдений в наклоне спектра использовано среднестатистическое распределение амплитуд дпр в канале наклона спектра независимо от разноса частот Δf_i ($\Delta I_1, \Delta I_2$) для событий с потоком высокоэнергетичных частиц у орбиты Земли, находящимся в пределах $10 < F < 10^3 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1} / 19$. Исследование статистических характеристик полученного распределения проводилось в том же порядке и теми же методами, что изложены в Приложении. Средние значения \bar{A}_n за день в периоды до и после вспышки, их дисперсии и доверительные интервалы приведены в табл. 5.

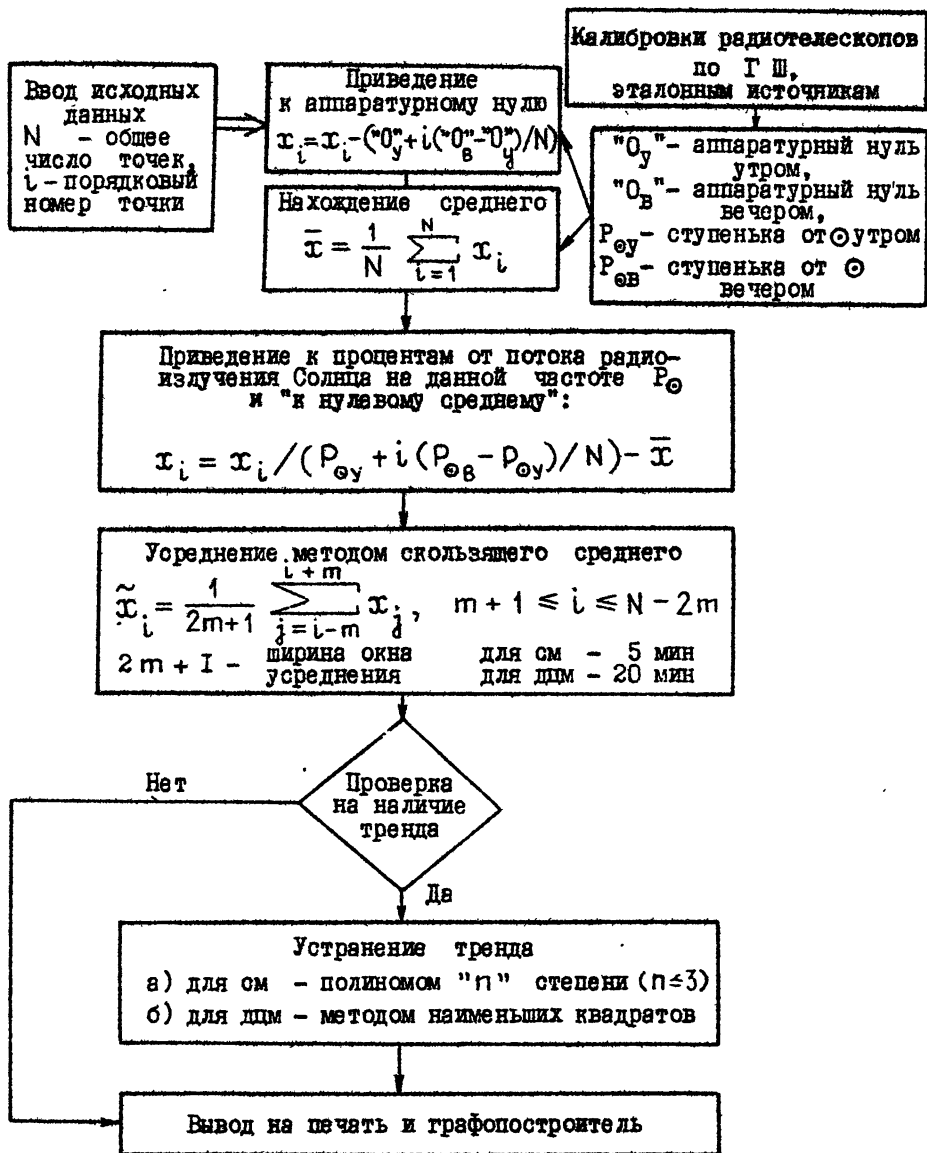


Рис. 2. Алгоритм обработки записи дсм

Данные по средним амплитудам дооперционных пульсаций
сантиметрового табл.3 и дециметрового табл.4 измерений в периоды вспышек

Таблица 3

Δf	сутки	-4	-3	-2	-1	-1/2	*	+1/2	+1	+2	+3
ΔI_1	$\bar{A}_n (\% P_{00})$	0,32	0,48	0,66	0,9	0,53	0,19	0,13	0,36	0,19	0,13
$\Delta f_1 = 200$ МГц	S^2	0,01	0,01	0,12	0,18	0,15	0,1	0,002	0,1		
	доверите льный интервал	0,45	0,17	0,4	1,9	0,65	0,37				
ΔI_2	$\bar{A}_n (\% P_{00})$	0,48	0,49	0,54	-	-	0,52	0,32			
$\Delta f_2 = 700$ МГц	S^2	0,05	0,13	0,098	-	-	0,16	0,06			
	доверите льный интервал	0,38	0,3	0,26	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 4

	сутки	-3	-2	-1	-1/2	*	+1/2	+1	+2
I	$\bar{A}_n (\% P_{00})$	0,40	0,84	1,42	1,70	1,5	0,52	0,33	0,33
$f = 755$ МГц	S^2	0,001	0,123	1,060	0,721	0,347	0,168	0,014	0,014
	доверите льный интервал	0,298	0,435	0,510	1,350	0,494	0,276	1,060	

Данные по средним амплитудам долгопериодных пульсаций
сантиметрового излучения для геоэффективных вспышек

	Сутки	-3	-2	-1	-1/2	*
I	2	3	4	5	6	
$\Delta I(\Delta f_i)$	$\bar{A}_n (\% P_{\odot \odot})$	0,38	0,41	0,54	0,55	
	S^2	0,04	0,02	0,08	0,005	
	Доверительный интервал	0,1	0,07	0,1	0,05	
	Сутки	+1/2	+1	+2	+3	
7	8	9	10	11	12	
$\Delta I(\Delta f_i)$	$\bar{A}_n (\% P_{\odot \odot})$	0,41	0,22	0,20	0,15	
	S^2	0,02	0,01	0,005		
	Доверительный интервал	0,04	0,06	0,07		

Проверка достоверности эффекта показала, что действительно имеет место нарастание \bar{A}_n перед вспышкой и резкий спад после нее (по t -критерию с 10-процентным уровнем значимости).

У. На основании проведенного выше рассмотрения можно предложить один из вариантов правила, позволяющего прогнозировать факт протонной вспышки по характеристикам дпр.

Если средняя амплитуда дпр ($T > 20$ мин.) наклона спектра сантиметрового радиоизлучения \bar{A}_n и (или) средняя амплитуда дпр ($T > 40$ мин.) потока радиоизлучения в дециметровом диапазоне длин волн \bar{A} за i -й день наблюдения в два раза или более превышает среднюю амплитуду дпр $\bar{A}_{\text{сп}\odot}$ для "спокойного" Солнца, то $i + 1$ и $i + 2$ дни считаются днями прогноза, то есть дается прогноз на протонную вспышку в течение двух дней, начиная с момента окончания наблюдений в i -й день.

Количественно для используемой аппаратуры это правило можно записать:

- а) для сантиметрового диапазона $\bar{A}_n \geq 2 \bar{A}_{\text{сп}\odot} \approx 0,3 \% P_{\odot \odot}$,
 б) для дециметрового диапазона $\bar{A}_n \geq 2 \bar{A}_{\text{сп}\odot} \approx 0,6 \% P_{\odot \odot}$,

Анализ имеющихся наблюдений дюр целесообразно провести в форме таблицы сопряженности /17/, построенной в виде

		Наблюдения	
		да	нет
Прогноз	да	I	II
	нет	III	IV

где под прогнозом понимается сформулированное прогностическое правило, а под наблюдениями факт совершения или несвершения вспышки. Квадрат, обозначенный цифрой I, характеризует оправдавшийся прогноз при наличии вспышки - прогноз "да-да". Квадрат обозначенный цифрой II, означает ложный прогноз при отсутствии вспышки - ложная тревога "да-нет". Квадрат, обозначенный цифрой III, означает отсутствие прогноза при наличии вспышки - пропуск цели "нет-да". Квадрат, обозначенный цифрой IV, характеризует оправдавшийся прогноз при отсутствии вспышки - прогноз "нет-нет". Результаты прогнозирования указанным способом по данным дюр отражены в табл. 6 и 7.

Таблицы сопряженности данных наклона спектра для разноса частот

Таблица 6

		Наблюдения		
		да	нет	сумма
Прогноз	200 МГц			
	да	6	4	10
	нет	2	20	22
	сумма	8	24	32

Таблица 7

		Наблюдения		
		да	нет	сумма
Прогноз	700 МГц			
	да	6	4	10
	нет	1	23	24
	сумма	7	27	34

Таблица сопряженности сама по себе не может служить окончательным методом оценки качества методики, однако обеспечивает основу, по которой можно получить ряд полезных критериев или индексов.

Весь материал наблюдений наклона спектра ΔI разбит на 2 ансамбля: 1) с разносом частот $\Delta f = 200$ МГц, 2) с разносом частот $\Delta f = 700$ МГц.

Поскольку величина средней амплитуды пульсаций наклона спектра для "спокойного" Солнца одинакова при разносе частот в 200 и 700 МГц, а прогностическое правило сформулировано таким образом, что величина разноса частот не влияет на результаты прогноза, то данные обеих таблиц можно объединить в табл. 8, если не использовать дважды данные, относящиеся к одному и тому же событию.

Таблица 8

Таблица сопряженности суммарных данных наклона спектра

		Наблюдения		
		да	нет	сумма
Прогноз	да	11	5	16
	нет	3	28	31
	сумма	14	33	47

Как видно из анализа этих таблиц, вероятность прогноза протонной вспышки составляет примерно 0,6, вероятность прогноза отсутствия протонной вспышки около 0,90+0,91.

Для последнего случая проанализируем события, вошедшие во 2 и 3 ансамбли событий.

Пять событий, вошедших в ансамбль 2 (ложная тревога), следующие: 01.03.70; 29.07.72; 30.03.80; 07.03.80.

01.03.70 г. — амплитуда пульсаций составляет немногим более 0,3% P_{00} . Однако необходимо отметить, что, возможно, это связано с неправильным определением отсчетной величины пульсаций "спокойного" Солнца для станции, работавшей в 1970 г., на Кубе. Есть основания полагать, что определенный вклад в величину регистрируемых пульсаций в условиях влажного тропического климата (Куба) вносят вариации сигнала, обусловленные средой его распространения.

Оценка вклада этих вариаций должна привести к увеличению величины регистрируемых пульсаций при "спокойном" Солнце и переформулировке количественного критерия прогностического правила. Тогда данный день наблюдений будет перенесен в ансамбль 4 - "нет-нет".

29.07.72; 30.03.80; 31.03.80 - события, наблюдаемые более, чем за два дня до протонных вспышек. Поэтому их внесение в ансамбль 2 скорее отражает ограниченность сформулированного прогностического правила, чем выпадение из ансамбля событий I "да-да".

07.03.80 - отметим, что это событие наблюдалось с разном частот в 700 МГц при переменной облачности.

Как указано в /17/, величины пульсаций при таком разном более подвержены влиянию погодных условий, что, возможно, и нашло отражение в данном случае.

Три события, вошедшие в ансамбль 3 (пропуск цели), соответствуют пропуску протонных вспышек, происшедших 23.09.78, 14.10.80 и 15.10.80. Поэтому можно говорить о двух последовательностях имеющихся данных: 21-23.09.78 и 13-14.10.80. В обеих последовательностях наблюдается рост средней амплитуды пульсаций ото дня ко дню. Однако количественного значения, определенного в прогностическом правиле, амплитуда пульсаций в обоих случаях не достигает. Возможно, что прогностическое правило может быть дополнено условием на величину производной амплитуды пульсаций в двух последовательных интервалах наблюдений, но на данном объеме материала это сделать не представляется возможным.

Рассматриваемый материал содержит одиннадцать оправдавшихся прогнозов протонных событий, в семи из которых (вероятность 0,64) заблаговременность прогноза составила от 36 до 48 часов со средним временем 43,5 часа от момента конца интервала наблюдений до начала протонной вспышки.

В соответствии с вышеизложенным построена табл.9 сопряженности по наблюдениям пульсаций в дециметровом диапазоне длин волн.

Таблица 9

Таблица сопряженности данных интенсивности ($\varphi = 755$ МГц)

		Наблюдения		
		да	нет	сумма
Прогноз	да	21	12	33
	нет	4	56	60
	сумма	25	68	93

Как видно из анализа табл.9, вероятность прогноза факта возникновения протонной вспышки составляет примерно 0,64, вероятность прогноза отсутствия протонной вспышки около 0,93.

Из двенадцати событий, вошедших в ансамбль "ложных тревог", восемь, возможно, связано с высокой всплешечной активностью протонных областей AR 3178 (июль 1981), NR 18405 (июнь 1982), NR 18474 (июль 1982) при прохождении их по диску Солнца. В событии 08.06.79 наблюдается повышенный уровень амплитуд пульсаций.

В остальных случаях 09.06.83, 25.05.84, 26.05.84 долгопериодные пульсации повышенной амплитуды появились раньше, чем за два дня, до протонной вспышки.

В ансамбле событий "пропуск цели" - четыре события:

1. 29.06.80 - источник выхода протонов находится за W - лимбом,
2. 06.08.80 - источник выхода протонов неизвестен,
3. 07.07.82 - радиисточник еще был за E - лимбом, а уже 08.07.82 наблюдалось $\bar{A} = 0,62$, так что за день до возникновения вспышка 09.07.82 предсказана,
4. 22.05.84 - протоны наблюдались на орбите Земли 24.05.84, но точной привязки ко вспышке нет.

Рассматриваемый материал содержит оправдавшийся прогноз двенадцати одного протонного события, в восьми из которых (вероятность 0,58) заблаговременность прогноза составила от 36 до 52 часов со средним временем 44,1 часа от момента конца интервала наблюдений до начала вспышки.

Информация, содержащаяся в таблице сопряженности, часто объединяется в один индекс S, называемый коэффициентом успешности прогнозов. Он определяется равенством $|I7/ S = (R - E)/(T - E)$, где R - число успешных прогнозов, T - общее число прогнозов, E - ожидаемое число оправдавшихся прогнозов; S = 1, когда все прогнозы оправдались, S = 0, когда число оправдавшихся прогнозов равно их ожидаемому числу, E получают, исходя из какого-нибудь простейшего стандартного прогноза, например, случайного, или прогноза "завтра будет то же, что сегодня", или климатологического прогноза.

В случае случайного прогноза

$$E = \frac{\sum_{i=1}^2 K_i C_i}{T}$$

(K_i - сумма i -й строки таблицы сопряженности; C_j - сумма j -го столбца).

Для табл.6 - "наклон спектра" (разнос 200МГц): $R = 26$, $E = 19,0$,
 $T = 32$, $S = 0,538$.

Для табл.7 "наклон спектра" (разнос 700МГц): $R = 29$, $E = 21,1$,
 $T = 34$, $S = 0,612$.

Для табл.8 "наклон спектра" (разнос 200 и 700 МГц) : $R = 39$,
 $E = 26,5$, $T = 47$, $S = 0,609$.

Для табл.9 (наблюдения на $f = 755$ МГц) : $R = 77$, $E = 52,7$,
 $T = 93$, $S = 0,630$.

Сравнение проанализированных материалов по сантиметровому и дециметровому радиоизлучениям показывает количественное сходство результатов по вероятности успешного прогноза, коэффициенту успешности, заблаговременности прогноза, полученных на независимых ансамблях протонных событий.

VI. Качество и эффективность любого прогностического правила необходимо оценивать, но лишь в сравнении с другими, ранее известными правилами. Поскольку всегда есть возможность для тривиального способа прогнозирования (случайный, "слепой", инерционный, климатологический прогноз), то есть и возможность для сравнения.

Таблицы сопряженности, представленные выше, позволяют количественно охарактеризовать оправдываемость P и относительный выигрыш R/T предсказания факта протонной вспышки по дпр. Для оценки эффективности предложенного правила сравним указанные величины с аналогичными для "слепого" прогноза, т.е. определим различие в относительном выигрыше

$$\frac{\Delta R}{T} = \frac{R - R'}{T}$$

и оправдываемости

$$\Delta P = P - P'$$

Для того, чтобы рассматриваемый метод можно было признать лучшим, необходимо, чтобы превышение $\Delta P = P - P'$ было статистически значимым.

Образуя новую переменную

$$Z = \frac{p - p'}{\sqrt{\frac{p'(1-p')}{T}}}$$

и сравнивая ее с Z_{α} , где α - уровень значимости, делаем вывод о значимом превышении Δp , если $Z > Z_{\alpha} / 14/$.

Результаты расчетов (отдельно по сантиметровому и дециметровому диапазонам и разным ΔI) приведены в табл. 10.

Отмечаем, что во всех рассмотренных случаях $Z > Z_{\alpha}$ при высоком уровне значимости: $\alpha \leq 0,05$ (см. рис.3/14/), следовательно, предложенное прогностическое правило имеет статистически значимое превышение оправдываемости над "слепым" прогнозом.⁺⁾

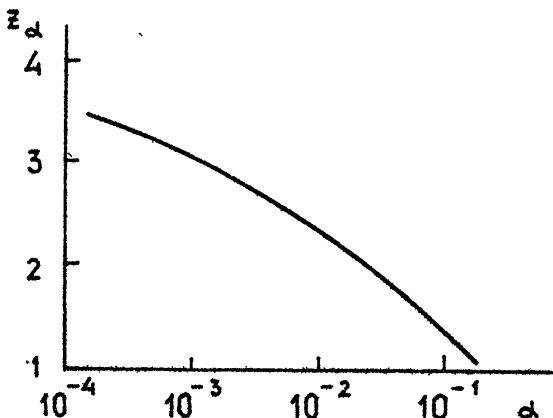


Рис. 3. Зависимость параметра Z_{α} от уровня значимости α /18/

Поскольку, как показано в /15/, "слепой" прогноз обладает наибольшей оправдываемостью по сравнению с другими тривиальными

^{+) Все оценки оправдываемости проводились при одинаковых и равных I стоимостях прогнозов различных классов. /15/.}

Данные по эффективности прогноза всплеск
при "слепои" прогнозе и предлагаемом методе

	ΔI ($\Delta f = 200$ МГц)	ΔI ($\Delta f = 700$ МГц)	ΔI ($\Delta f = 700$ МГц + 200 МГц)	I ($f = 755$ МГц)
	предл. "слепои" методика	предл. "слепои" методика	предл. "слепои" методика	предл. "слепои" методика
ρ	0,813	0,75	0,853	0,794
ρ'			0,830	0,702
R/T	0,625	0,5	0,706	0,588
R'/T			0,660	0,404
$\Delta\rho$	0,063		0,059	0,128
$\Delta R/T$	0,125		0,118	0,255
Z	0,823		0,851	1,919
				0,828
				0,731
				0,656
				0,462
				0,097
				0,194
				2,109

методами, то превышение оправдываемости рассматриваемой методики прогнозирования над оправдываемостью этих методов будет еще выше.

Вместе с тем, следует обратить внимание на примечание, относящееся к неформализуемому моменту отбора материала наблюдений для прогноза, осуществляемому на основе опыта и квалификаций наблюдателя. Определенное влияние на статистические оценки эффективности оказывает также тот факт, что в используемых выборках соотношение между количеством прогнозов наличия и отсутствия вспышек неадекватно тому же соотношению в генеральной совокупности.

Средние цифры вероятности прогноза протонных вспышек и их отсутствия на основе предложенного алгоритма не превышают достигнутых ранее другими методами результатов /1, 2, 3/. В то же время исследование случаев, попавших в ансамбли ложных тревог и пропуска цели, показывает, что логически оправданное усовершенствование предлагаемого алгоритма существенно повышает вероятность успешного прогноза протонных событий.

Рассмотренные вопросы возможной методики краткосрочного прогнозирования геоэффективных солнечных вспышек по характеристикам долгопериодных пульсаций сантиметрового и дециметрового радиоизлучения можно, на наш взгляд, считать основой для ее целенаправленной экспериментальной проверки, включая не рассматриваемые здесь подробно вопросы ограничений применения, совершенствования аппаратного обеспечения и эффективности в существующих схемах прогноза.

Отметим, что в данной работе изложены результаты экспериментальных исследований, связанных с большим кругом лиц, среди которых, в первую очередь, необходимо назвать В.В.Пахомова, С.Д.Снегирева, А.И.Коршунова, О.А.Пахомову, С.И.Арбузова, Г.Б.Фомичева, И.М.Зубова (НИРФИ); Лопанса В., Озолиньша Г., Элиасса М. (РО АН Латв.ССР).

П р и л о ж е н и е

Исследование статистических характеристик долгопериодных пульсаций радиоизлучения (дпр) сантиметрового и дециметрового диапазонов в спокойные периоды проводилось по материалам наблюдений радиоизлучения Солнца, описанным в основном тексте.

Так как имеющиеся как в сантиметровом, так и дециметровом диапазонах ряды наблюдений не являются однородными, то каждый ряд был сгруппирован

- а) по параметрам используемой аппаратуры - для см (разности частот в канале наклона спектра $\Delta f_i = 200, 700$ МГц),
- б) по погодным условиям (ясно-облачно),
- в) по степени активности Солнца ("спокойное" Солнце - слабая вспышечная активность).

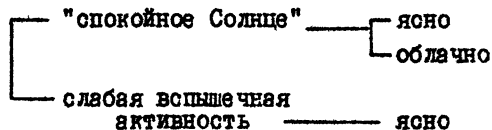
Использование такой группировки позволило провести статистические исследования по следующим выборкам:

I. Канал ΔI_1 ($\Delta f_1 = 200$ МГц) - "относительно спокойное" Солнце - "спокойное" Солнце + слабая вспышечная активность.

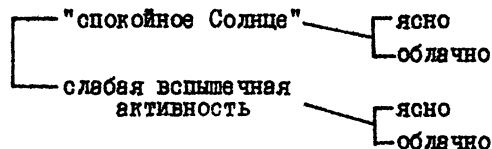
II. Канал ΔI_2 ($\Delta f_2 = 700$ МГц) - "относительно спокойное" Солнце - "спокойное" Солнце + слабая вспышечная активность.

Вследствие малой статистики I и II выборки рассматривались вне зависимости от погоды и вспышечной активности.

III. Канал I ($\lambda \approx 3$ см)



IV. Канал I ($f = 755$ МГц)



С целью исключения возможных грубых ошибок проведена проверка каждой выборки на однородность методом сравнения крайних элементов выборки с ее средним значением /16/. Возможность использования статистической обработки показана при проверке каждой выборки на

нормальность распределения \bar{A}_n по следующему критерию согласия: если

$$|A| \leq 3 \sqrt{D(A)},$$

$$|E| \leq 5 \sqrt{D(E)},$$

то наблюдаемое распределение можно считать нормальным. Здесь

$$A = \frac{1}{nS^3} \sum_{i=1}^n (A_{ni} - \bar{A}_n)^3 - \text{асимметрия},$$

$$E = \frac{1}{nS^4} \sum_{i=1}^n (A_{ni} - \bar{A}_n)^4 - 3 - \text{эксцесс},$$

$$D(A) = \frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)},$$

$$D(E) = \frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)},$$

n - число элементов выборки, S^2 - выборочная дисперсия.

Результаты расчета средней амплитуды дщр \bar{A}_n , дисперсии S^2 и доверительных интервалов $\alpha_{0.95}$ для каждой выборки приведены в табл. III. Сравним средние значения \bar{A}_n двух первых выборок $\Delta I_1(\Delta f_1)$ и $\Delta I_2(\Delta f_2)$ для выяснения влияния разности частот на средние амплитуды дщр в наклоне спектра в период "относительно спокойного" Солнца. Используем при этом t -критерий /16/; сопоставив выборочные дисперсии $S_1^2(\Delta I_1)$ и $S_2^2(\Delta I_2)$ в виде отношения $F = S_1^2 / S_2^2$, из таблиц /18/ с уровнем значимости p найдя $F_{1-p}(n_1-1; n_2-1)$, где n_1 - число элементов ΔI_1 и равно 17, n_2 - число элементов ΔI_2 и равно 15, получаем, что $F < F_{1-p}$ при $p = 0,05$, т.е. дисперсии S_1^2 и S_2^2 с таким уровнем значимости совпадают. Это обстоятельство дает право применить точный метод оценки двух средних. Подсчитывается средневзвешенная дисперсия

$$S^2 = \frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}.$$

Статистические характеристики используемого материала

	$\Delta I_1(\Delta f_1)$		$\Delta I_2(\Delta f_2)$		I ($\lambda \approx 3 \text{ см}$)			I ($f = 75 \text{ см}^2$)				
	"Спокойное" ☉ + слэбая вспышечная активностъ		"Спокойное" ☉ + слэбая вспышечная активностъ		"Спокойное" ☉		"Спокойное" ☉		слэбая вспышечная активностъ			
	ясно+облачно		ясно+облачно		ясно	облачно	ясно	облачно	ясно	облачно		
Число вспы- шек	I7		I5		I8	8	2I	-	I2	I7	9	II
$\bar{A}_r(\%)$	0,17		0,15		0,22	0,28	0,27	-	0,28	0,31	0,38	0,32
S^2	0,002		0,001		0,001	0,009	0,004	-	0,0050	0,0053	0,0170	0,0030
$\sigma_{0,95}$	0,0190		0,0144		0,0129	0,0638	0,0239	-	0,045	0,037	0,100	0,036

Тогда величина

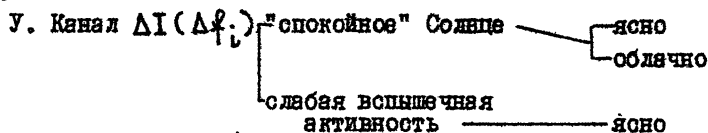
$$t = \frac{(\bar{A}_{n_1} - \bar{A}_{n_2}) - (a_1 - a_2)}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

имеет распределение Стьюдента с f степенями свободы, где $f = n_1 + n_2 - 2$, \bar{A}_{n_1} и \bar{A}_{n_2} - выборочные средние выборки I и 2, a_1 и a_2 - генеральные средние выборки I и 2. Нулевая гипотеза равенства генеральных средних отвергается, если

$$|\bar{A}_{n_1} - \bar{A}_{n_2}| \geq t_{1-p/2} S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$$

(значения квантилей берутся из таблиц /18/). Вычисления показали, что при 5-процентном уровне значимости $\bar{A}_n(\Delta f_1)$ и $\bar{A}_n(\Delta f_2)$ совпадают, т.е. разница в средних амплитудах наклона спектра при наблюдениях с разными разносами частот (в периоды "относительно спокойного" Солнца) статистически незначима (и определяется, в основном, шумовыми параметрами приемного устройства).

Это дает нам право для дальнейших исследований организовать еще одну выборку, содержащую данные, полученные как с $\Delta f_1 = 200$ МГц и $\Delta f_2 = 700$ МГц, так и с $\Delta f_3 = 400$ МГц (вследствие малости ансамбля использовать эти данные отдельно не представляется возможным).



Результаты расчета средней амплитуды \bar{A}_n , дисперсии S^2 , доверительных интервалов $\Omega_{0.95}$ приведены в табл. ПЗ.

Рассматривая влияние погодных условий на амплитуды дип в сантиметровом и дециметровом диапазонах в периоды "спокойного" Солнца, используем метод сравнения средних с 5-процентным уровнем значимости. Для данных каналов наклона спектра $\Delta I(\Delta f_v)$ и интенсивности

I ($f = 755$ МГц) можно применить точный метод оценки средних. А так как для I ($\lambda = 3$ см) дисперсии в группах ясно-облачно по критерию Фишера не совпадают ($F > F_{1-p}$), то применяется приближенный метод оценки двух средних /16/: подсчитывается величина

$$T = \frac{v_1 t_{1-p/2}(f_1) + v_2 t_{1-p/2}(f_2)}{\sqrt{v_1 + v_2}};$$

где

$$v_1 = \frac{S_1^2}{n_1}, \quad v_2 = \frac{S_2^2}{n_2}, \quad f_1 = n_1 - 1, \quad f_2 = n_2 - 1$$

и гипотеза равенства средних отклоняется, если $|\bar{A}_{n_1} - \bar{A}_{n_2}| > T$.

Расчеты показывают (см. табл. ПЗв, ПЗб), что в периоды наблюдений "спокойного" Солнца с 5-процентным уровнем значимости на амплитуду дпр в интенсивности ($f = 755$ МГц и $\lambda = 3$ см) и наклоне спектра не влияют перистые облака, легкая облачность.

Таблица ПЗ

Статистические характеристики данных наклона спектра

$\Delta I (\Delta f_i)$

	$\Delta I (\Delta f_i)$			
	"спокойное" Солнце		слабая вспышечная активность	
	ясно	облачно	ясно	облачно
Число дней	14	6	12	-
$\bar{A}_n (\% P_{0\oplus})$	0,14	0,17	0,16	-
S^2	0,002	0,001	0,002	-
$\alpha_{0.95}$	0,0211	0,0261	0,0232	-

Результаты оценивания данных (по t - критерию /16/)

Таблица П3а

	$\Delta I (\Delta f_i)$	$I (f = 755 \text{ МГц})$
F	2	1,06
F _{1-p}	3,03	2,4
S ²	$17,1 \times 10^{-4}$	$51,8 \times 10^{-4}$
$t_{1-p/2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$	0,0422	0,0561
$\bar{A}_{n_1} - \bar{A}_{n_2}$	0,03	0,03

Таблица П3б

	$I (\lambda = 3 \text{ см})$
F	9
F _{1-p}	2,61
σ_1	$0,555 \times 10^{-4}$
σ_2	$11,25 \times 10^{-4}$
T	0,08
$\bar{A}_{n_1} - \bar{A}_{n_2}$	0,06

Полученный статистически результат независимости амплитуд дпр в $I(\lambda = 3 \text{ см})$ от условий наблюдений (ясно-облачно) не отражает наблюдаемого эффекта влияния изменения погоды на дпр. Такой вывод, по-видимому, может быть связан с неадекватностью замены распределения наблюдаемой величины нормальным из-за малой статистики: $n = 8$. В дальнейшем анализе данные по интенсивности $I(\lambda = 3 \text{ см})$ из выборки "облачно" не использовались.

Для определения исходного уровня дпр важно исследовать влияние на них слабой вспышечной активности. Проводя анализ выборок для $\Delta I(\Delta f_i)$, $I(\lambda = 3 \text{ см})$ и $I(f = 755 \text{ МГц})$ (см. табл. П4), получаем, что наличие слабой вспышечной активности с 5-процентным уровнем значимости не влияет на уровень амплитуд дпр при наблюдениях наклона спектра $\Delta I(\Delta f_i)$ и интенсивности $I(f = 755 \text{ МГц})$. Величина амплитуды дпр в интенсивности $I(\lambda = 3 \text{ см})$ зависит от состояния солнечной активности.

Таблица П4

Результаты сравнения данных
при слабой вспышечной активности (по t - критерию /16/)

	$\Delta I(\Delta f_i)$	$I(\lambda = 3 \text{ см})$	$I(f = 755 \text{ МГц})$
F	I	4	I,92
F_{1-p}	2,63	2,23	I,94
S^2	u_1, u_2	$1,9 \times 10^{-4}$	5×10^{-4}
$t_{1-p/2} \sqrt{\frac{S^2}{n_1 - 1}}$	0,002	$0,55 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-4}$
T	0,032	0,033	0,0538
$A_{n_1} - A_{n_2}$	0,02	0,05	0,050

Таким образом, исходный уровень амплитуд дпр в наклоне спектра $\Delta I(\Delta f_i)$ можно определить как средний, независимо от условий наблюдения (ясно-облачно) и слабой вспышечной активности, равный $\approx 0,15 P_{00}(\lambda \approx 3 \text{ см})$.

За исходный уровень амплитуд дпр в дециметровом радиозлучении можно принять величину \bar{A}_n в период "относительно спокойного"

Солнца (ясно + облачно), равную $0,3\% P_{\odot}$ - интенсивности радиоизлучения на частоте $f = 755$ МГц. (По t - критерию с 5-процентным уровнем значимости: $T = 0,1006 > |A_{n_1} - A_{n_2}| = 0,06$ - сделан вывод о совпадении генеральных средних выборок "ясно" и "облачно" при слабой вспыхивающей активности).

Как показывают эксперименты, на наблюдения I ($f = 755$ МГц) существенным образом могут влиять дождевые облака, грозовые облака, сильный ветер - период "тучи". Проверка на равенство генеральных средних выборок, приведенных в табл. П5а, с помощью t - критерия (табл. П5б) показала их различие с вероятностью 95%. Следовательно, при отборе материалов наблюдений дпр в дециметровом диапазоне влиянием неблагоприятных погодных условий ("тучи") пренебрегать нельзя.

Сравнение данных I ($f = 755$ МГц)
при различных погодных условиях

Таблица П5а

	I ($f = 755$ МГц)	
	"относительно спокойное"	
	ясно+ облачно	тучи
Количество записей	49	12
$\bar{A}_n (\% P_{\odot})$	0,3	0,59
S^2	0,0074	0,078
$\alpha_{0.95}$	0,0246	0,178

Таблица П5б

	I ($f = 755$ МГц)
F	10,5
F_{1-p}	1,96
ν_1	0,0065
ν_2	0,00015
T	0,066
$\bar{A}_{n_1} - \bar{A}_{n_2}$	0,29

Л и т е р а т у р а

1. Enome S. A review of short term flare forecasting activities at Toyokawa, 1978, p.10 /ISTPPWP, preprint N 11/.
2. Simon P. Solar-Terrestrial Predictions Proceedings at Meudon, 1978, p.20 /ISTPPWP, preprint N 19/.
3. A review of the works in the Peking observatory on the predictions of solar activities. Boulder, 1978, p.14 (Preprint N 32). Solar activity prediction group, Department of Solar Physics, Peking observatory).
4. Кобрин М.М., Коршунов А.И., Снегирев С.Д., Тимофеев В.В. О резком возрастании квазипериодических компонентов флуктуаций наклона спектра радиоизлучения Солнца на волне $\lambda = 3$ см в период, предшествующий активным событиям августа 1972 года. // Солнечные данные. - 1973. - № 10. - С. 79-85.
5. Кобрин М.М. и др. О существовании связи квазипериодических колебаний с периодами более 20 минут в радиоизлучении Солнца на волне 3 см с возникновением протонных вспышек. - Горький, 1975. - 20 с. (Препринт № 83, НИРФИ).
6. Kobrin M.M. et al. Manifestation of pulsation instability in solar radio emission preceding proton flares. - Solar Phys., 1978, v.56, p.359.
7. Изучение возможности использования наблюдений флуктуаций радиоизлучения Солнца на радиотелескопе РТ-2Ф в диапазоне 3 см для целей краткосрочного прогнозирования мощных вспышек (отчет). "Период" № гос. регистрации 78077752, НИРФИ, Кобрин М.М. - Горький, 1979. - 146 с.
8. Кобрин М.М. и др. Результаты исследований эффекта возрастания долгопериодных пульсаций сантиметрового радиоизлучения Солнца перед мощными вспышками. - АЦ, 1981. - № 1201. - С. 1-3.
9. Аверьянихина Е.А., Паупере М.Э., Озолньш Г., Эллиас М. О характере изменения амплитуды флуктуаций интенсивности радиоизлучения Солнца в дециметровом диапазоне перед мощными всплесками, связанными со вспышками. - В кн.: Исследование Солнца и красных

звезд. - Рига: Зинатне, 1982. - Вып. 16. - С.61-74.

10. Кобрин М.М., Семенова С.В., Фридман В.М., Шейнер О.А. Исследование эффекта возрастания долгопериодных пульсаций радиоизлучения Солнца перед протонными вспышками как возможного прогностического параметра. - В кн.: IV Симпозиум КАПГ по солнечноземной физике. Сочи, ноябрь 1984 (Тезисы докладов). - М., 1984. - С. 136.
11. Averianichyna E.A. et al. On the possibility of the use of observations of solar decimeter radio emission fluctuations for the forecast of solar proton flares. - In the : Contribution of Astronomical observatory Skaunatê Pleso, 1986, v.XV, N 2, p.575-583.
12. Кобрин М.М. Изучение флуктуаций солнечного радиоизлучения и возможности получения информации о некоторых физических процессах на Солнце. - *Phys.Solariterr.*, 1976. - № 2. - С. 3-21.
13. Озолиньш Г., Элиасс М. Радиометрическая установка дециметровых волн. - В кн.: Исследования Солнца и красных звезд. - Рига: Зинатне, 1981. - Вып. 12. - С. 77-81.
14. Штурм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. - М.: Мир, 1970. - 368 с.
15. Буров В.А. Некоторые требования к статистическим схемам прогноза проявлений солнечной активности. - *Phys.Solariterr.*, 1981. - № 16. - С. 106-110.
16. Пустыльник Б.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. - М.: Наука, 1968. - 288 с.
17. Пановский Г.А., Брайер Г.В. Статистические методы в метеорологии. - Л.: Гидрометеиздат, 1967. - 242 с.
18. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. - М.: Наука, 1983.
19. Каталог солнечных протонных событий 1970-1979 гг. - М.: ИЗМИРАН, 1982. - 184 с.

Дата поступления статьи

12 марта 1987 г.

Светлана Вениаминовна Семенова
Владимир Матвеевич Фридман
Ольга Александровна Шейнер
Елена Александровна Аверьянихина
Мара Эдмундовна Паукере

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ МЕТОДИКИ
КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОТОННЫХ ВСПЫШЕК
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ
СОЛНЕЧНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Подписано в печать 6.04.87 г. МШ 00887. Формат 80x80/16
Бумага множительная. Печать офсетная. Объем 1,78 усл. л. л.
Заказ 4556. Тираж 120. Бесплатно

Отпечатано на ротационной НИРФИ