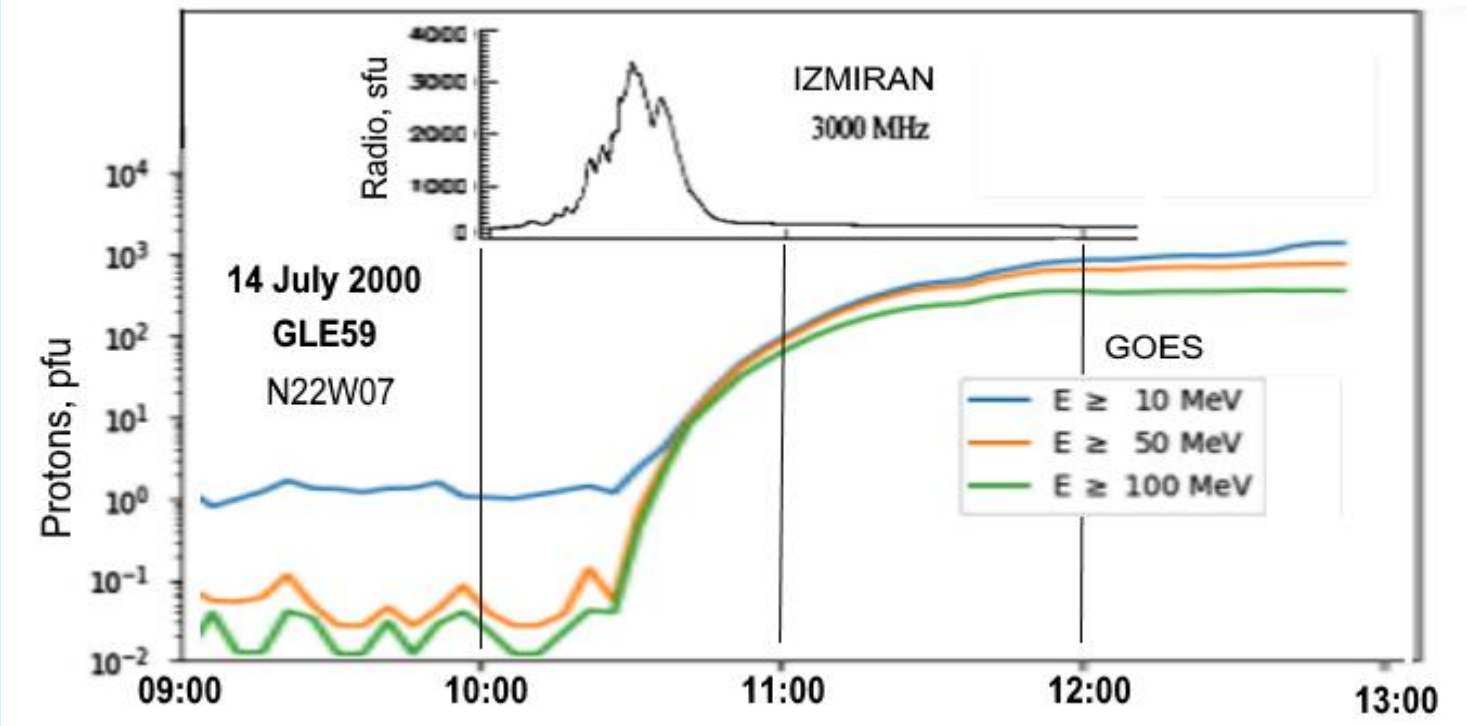
КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ДИАГНОСТИКА СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ О РАДИОВСПЛЕСКАХ

Черток И.М., Фомичёв В.В.

(ИЗМИРАН)

В основном, по работам *Акиньян С.Т., Фомичёв, Черток* (1977…)

Диагностика: по характеру и интенсивности радиовсплесков происходящей или уже произошедшей вспышки оценка ожидаемых у Земли потоков протонов с энергией десятки МэВ (и величины поглощения коротких радиоволн в полярной шапке типа ППШ) с заблаговременностью десятки минут - часы



Методика ИЗМИРАН

Солнечные Протонные События (СПС) 1965-1969 гг. (фаза роста Цикла 20)

Каталог *Svestka and Simon* (Eds.) (1975)

Западные (W20-80) уверенно отождествлённые события

-- Пиковый и интегральный потоки микроволновых всплесков на f ~ 3, 5, 9, 15 ГГц ⟶ Поток протонов у Земли с E>10, 30 и 60 МэВ

$J_{10}(S)$ – функция интенсивности

Методика ИЗМИРАН

-- Метровая компонента радиоизлучения (всплески II, III, IV типов) ⟶

Условия выхода частиц из области ускорения

Сильная, умеренная, слабая метровая компонента ⟶

Благоприятные, средние, неблагоприятные условия выхода

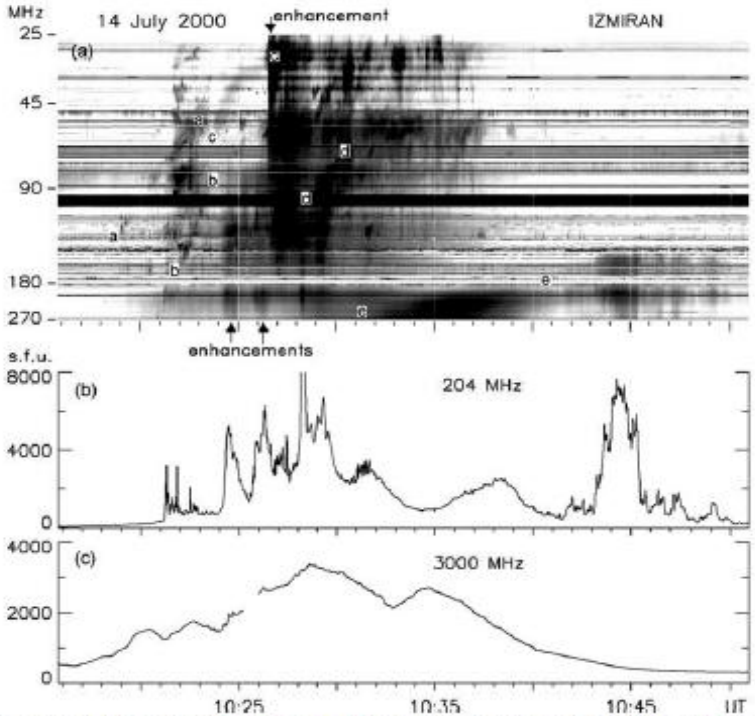
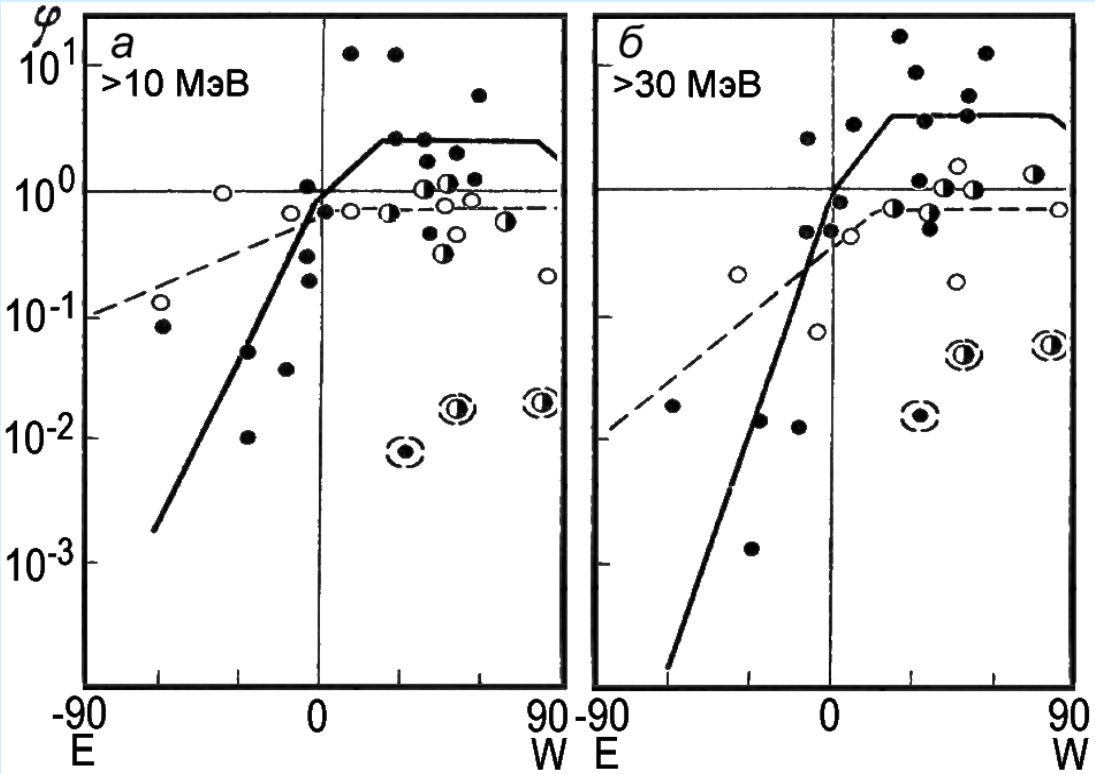


Figure 3. Intermediate-scale dynamic spectrum (a), 204 MHz metric (b) and 3000 MHz microwave (c) profiles of the Bastille Day event. Several type II bands and slow-drifting decimetric continuum are marked by indexes (aa)–(dd) and (ee), respectively.

Методика ИЗМИРАН

$$\varphi = J_{набл} / J_{расч}$$

Позволяет количественно учесть условия выхода, перейти к восточным вспышкам и определить для них функции гелиодолготного ослабления приходящих к Земле потоков протонов



Методика ИЗМИРАН

Частотный спектр микроволновых всплесков →
Энергетический спектр протонов в диапазоне E~10-100 МэВ

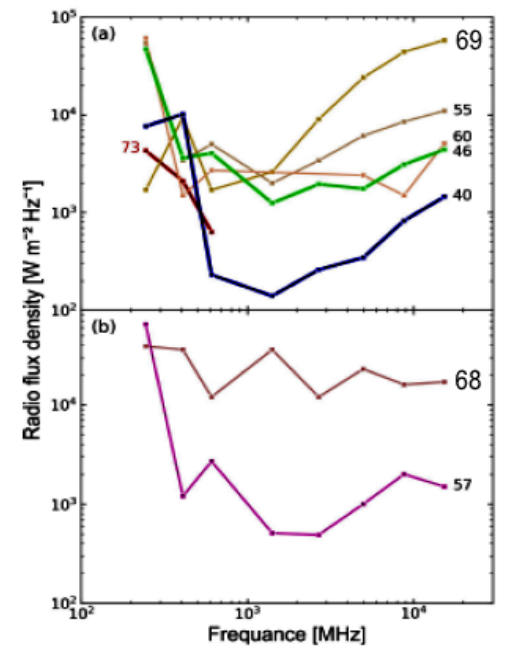
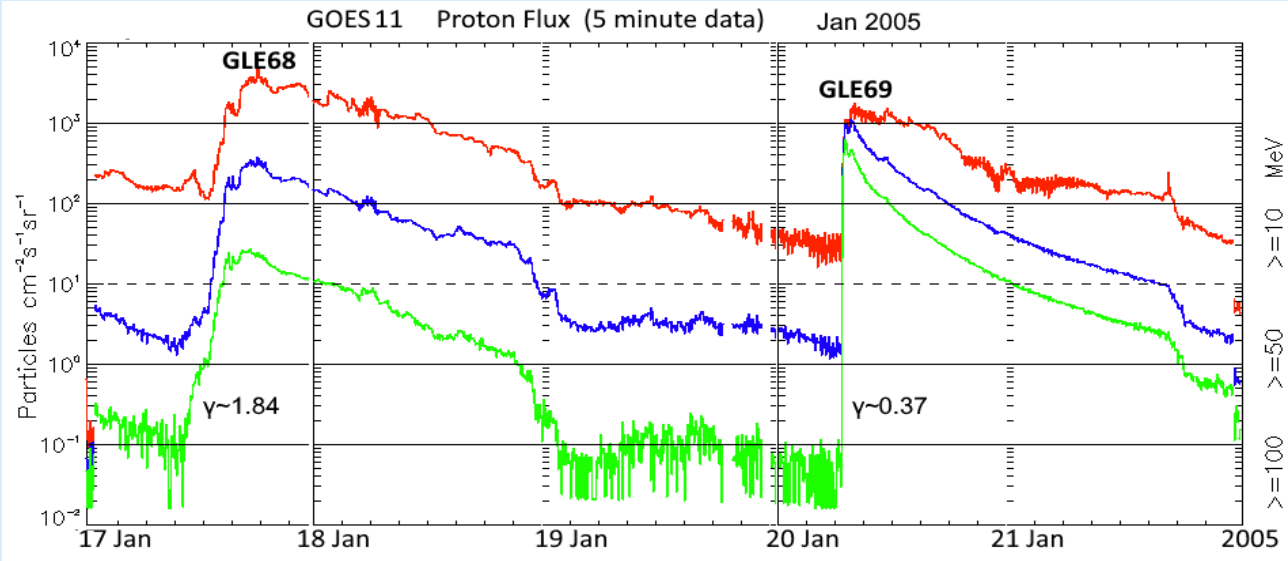


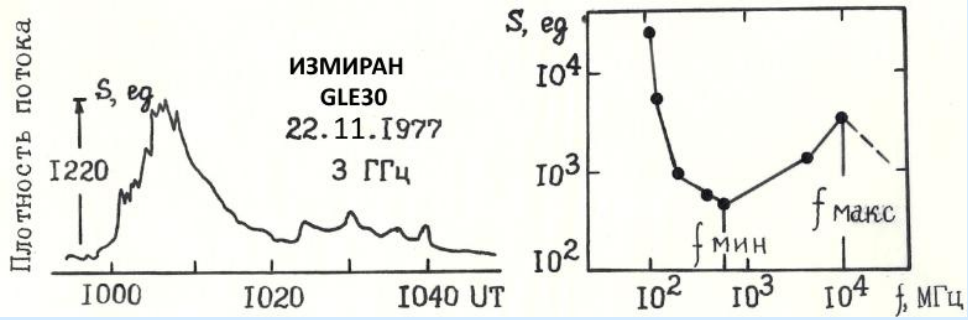
Figure 3. Frequency spectra of radio bursts of the GLE events with the hard (*panel a*) and relatively soft (*b*) SEP energy spectra in the 10–100 MeV range.

Мягкий радиоспектр (fm~3-5 ГГц) –
мягкий (крутой) энергетический спектр протонов



Жёсткий радиоспектр (рост интенсивности с частотой) –
жесткий (плоский) энергетический спектр протонов

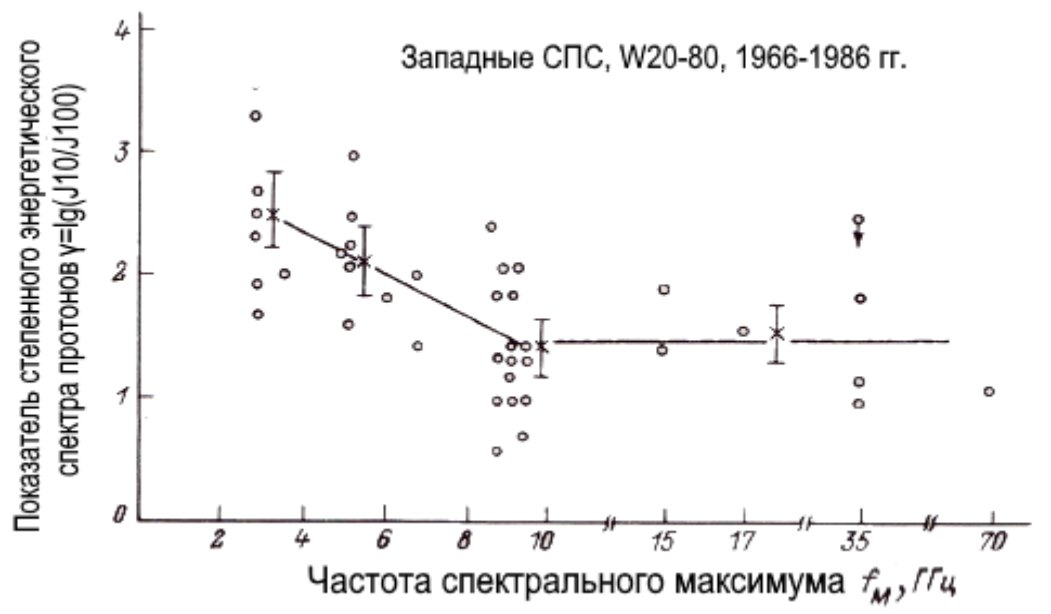
Зависимость показателя степенного энергетического спектра протонов *γ* в диапазоне 10-100 МэВ от частоты спектрального максимума *fm*

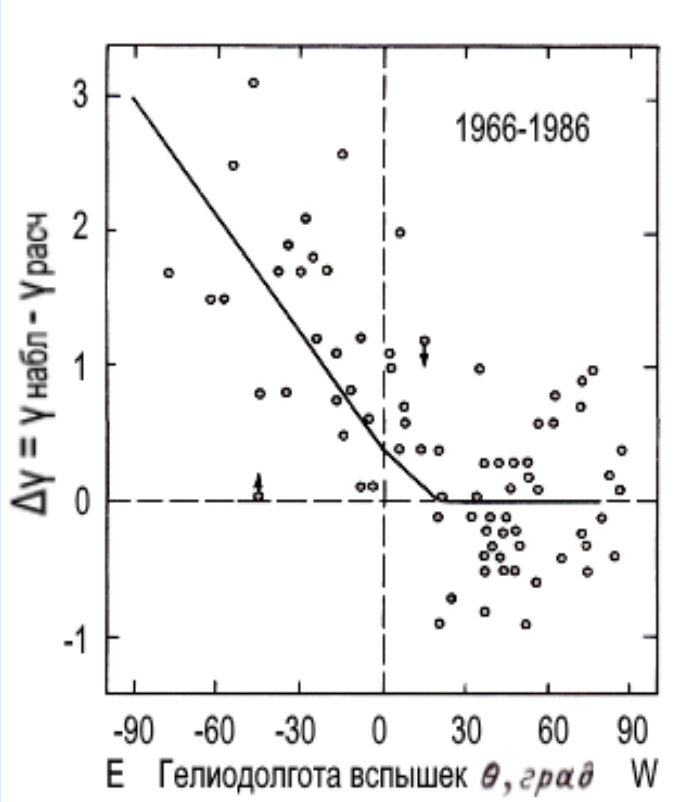


Микроволновый профиль и частотный спектр радиовсплеска, характерные для протонных вспышек

СПС 1966-1986

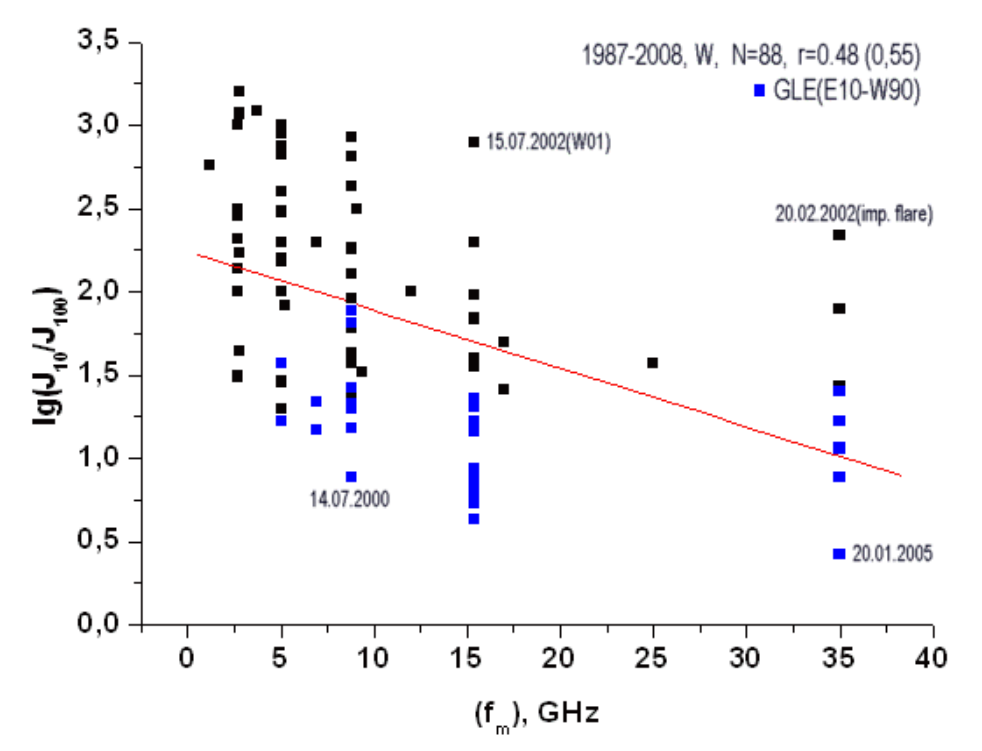
Δγ = γнабл - γрасч

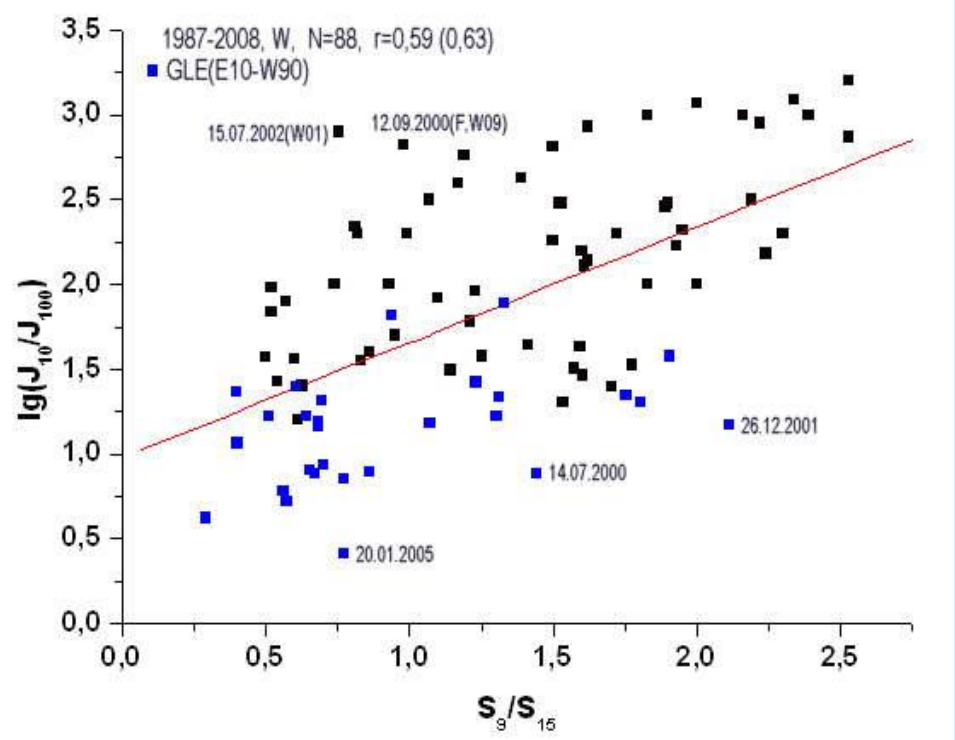




Черток (1982, 1989, 1990)

Зависимость *γ* от *fm* и от отношения радиопотоков *S9/S15*
Западные СПС 1987-2008

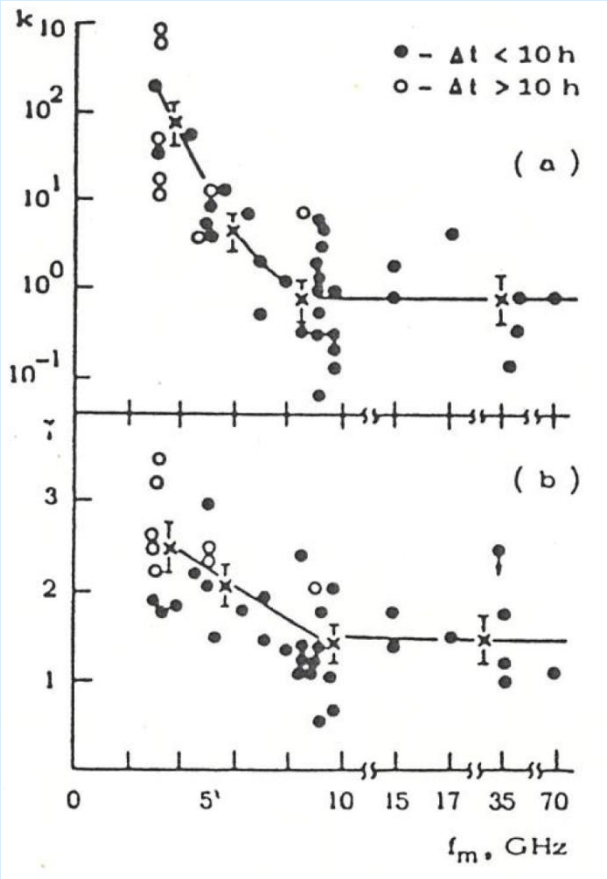




Черток, Гречнев, Мешалкина (2009)

Каталоги СПС под редакцией Ю.И.Логачёва за 1970-2019 гг. Циклы 20-24
http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/

СПС с мягким радиоспектром (fm ≤ 5 ГГц) :
избыточные и задержанные (Δt > 10 ч) потоки протонов на E>10 МэВ
с мягким энергетическим спектром (γ ≥ 2)



Фактор избыточности потока протонов

$$k = J_{набл} / [\varphi \cdot J_{расч}(S_f)]$$

Δt – временной интервал между максимумом микроволнового всплеска и пиком потока протонов

Соотношения между радио и энергетическим спектрами, а также задержанными и избыточными потоками протонов выходят за рамки «синдрома большой вспышки»

Kahler (1982)

Черток, Базилевская, Сладкова (1987); Базилевская и др. (1990); Chertok & Fomichev (1990)

Расчёт пиковой интенсивности потока протонов у Земли

$$J_E = k\,\varphi(\theta)\,J(S)$$

J_E – расчётный интегральный поток протонов с энергией E

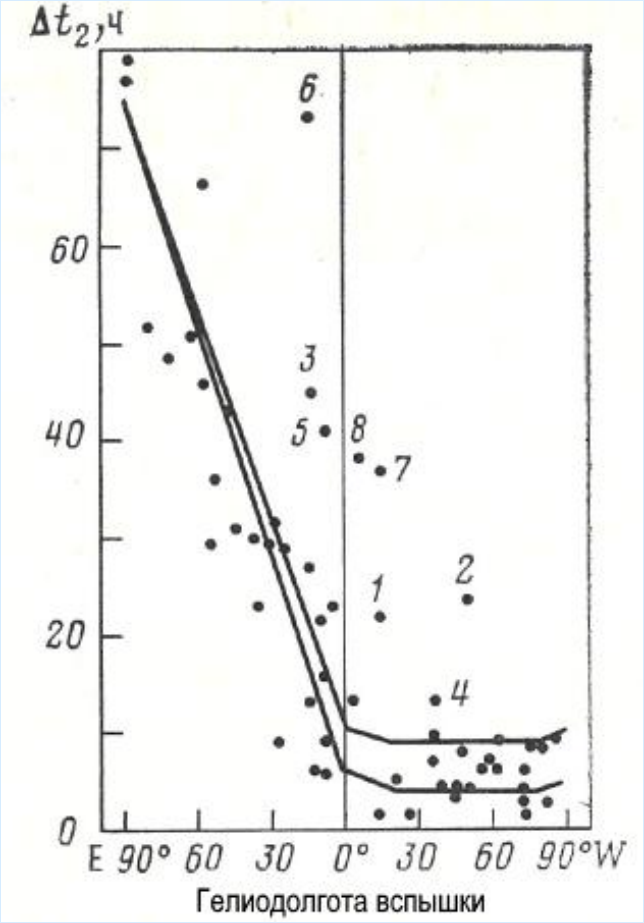
k – спектральный корректирующий коэффициент, учитывающий микроволновый радиоспектр

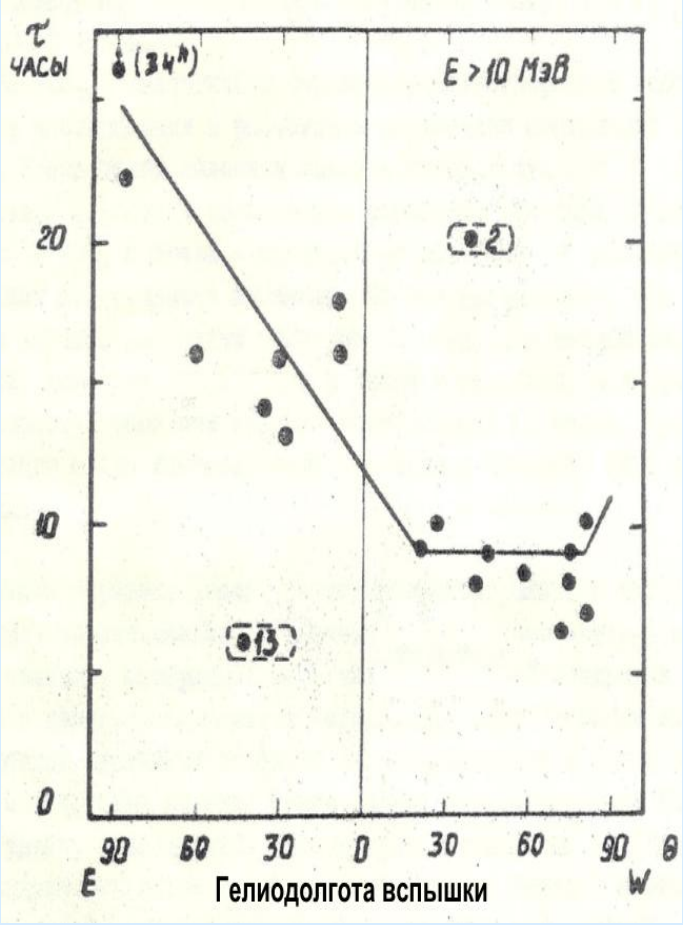
$\varphi(\theta)$ – функция выхода и гелиологотного ослабления потока протонов

$J(S)$ - опорная функция интенсивности потока протонов для радиопараметра S

Временные опорные функции, E>10 МэВ

Отсчёт времени от момента максимума микроволнового всплеска t_0





Δt_2 – время между t_0 и пиком протонного потока

τ – постоянная экспоненциального спада потока протонов

Примеры сопоставления наблюдаемых и расчётных временных профилей и энергетических спектров потоков протонов у Земли

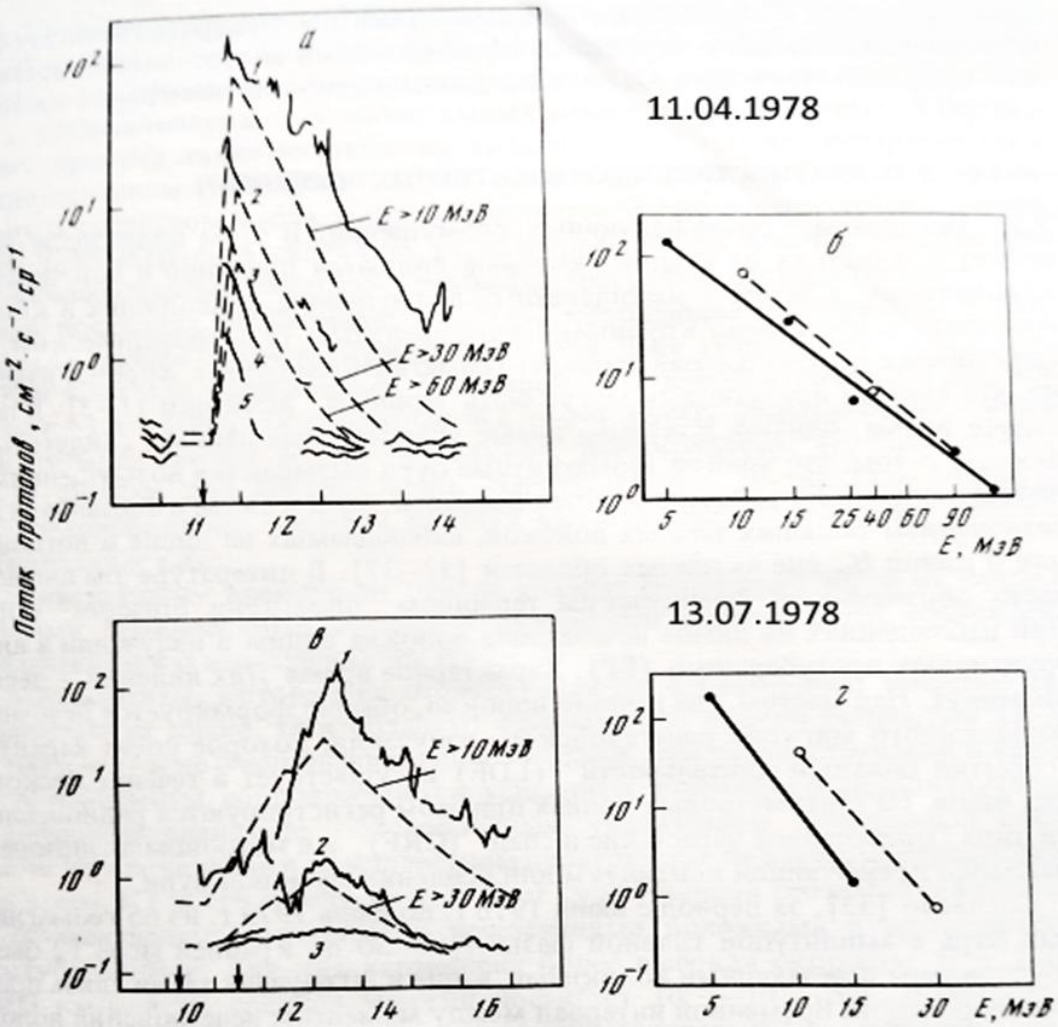


Рис. 4. Наблюдаемые (сплошные линии) и расчетные (штриховые) временные профили и энергетические спектры потоков протонов у Земли от западных (*а*, *б*) и восточных (*в*, *г*) вспышек

Выделение протонных вспышек с J (>10 МэВ) ≥ 5 pfu

Критерий протонности вспышек:

Наличие достаточно интенсивного (S ≥ 500 sfu) и продолжительного (неимпульсного) микроволнового всплеска, а также существенной метровой компоненты.

На современном языке это соответствует событиям с сильной вспышкой, крупным КВМ и развитым постэруптивным энерговыделением.

Ретроспективная проверка методики ИЗМИРАН по событиям 1970-1979 гг.

Полное моделирование реальной ситуации:

-- Анализ радиоизлучения всех вспышек.

-- Выделение протонных вспышек с использованием критерия.

-- Расчёт ожидаемых параметров потоков протонов с E>10, 30, 60 МэВ с учётом гелиодолготы вспышек и условий выхода протонов (метровой компоненты радиоизлучения).

Данные Solar-Geophysycal Data

Сеть USAF Radio Solar Telescope Network (RSTN):
круглосуточные наблюдения метровых динамических спектров и радиопотоков на восьми фиксированных частотах в диапазне от 245 МГц до 15.4 ГГц

ftp://ftp.sec.noaa.gov/pub/warehouse/

Фрагментарный анализ данных многих последующих лет, вплоть до событий циклов 24 и 25

Выделение протонных вспышек с J (>10 МэВ) ≥ 5 pfu

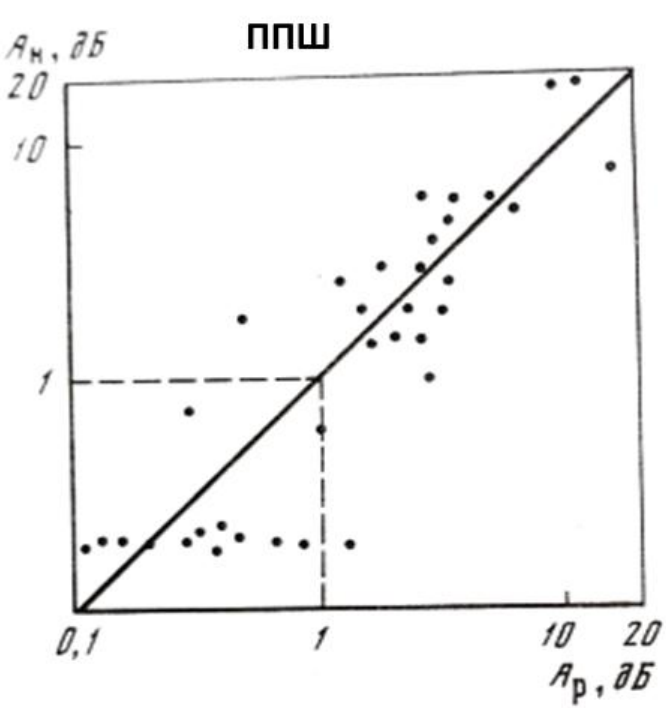
Уверенно отождествлённые западные СПС, 1970-1980 гг.

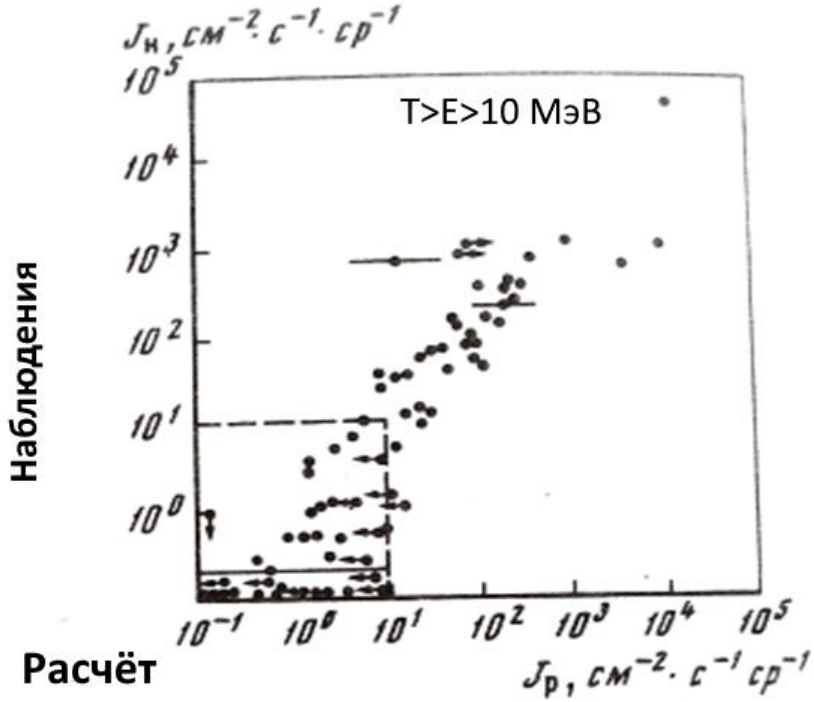
Таблица сопряженности

	НАБЛЮДЕНИЯ			
ПРОГНОЗ		«да»	«нет»	сумма
	«да»	27	5	32
	«нет»	11	193	204
	сумма	38	198	236

Существенное превышение оправдываемости рассматриваемого прогноза по сравнению с тривиальными прогнозами

Фомичёв, Черток (1988)





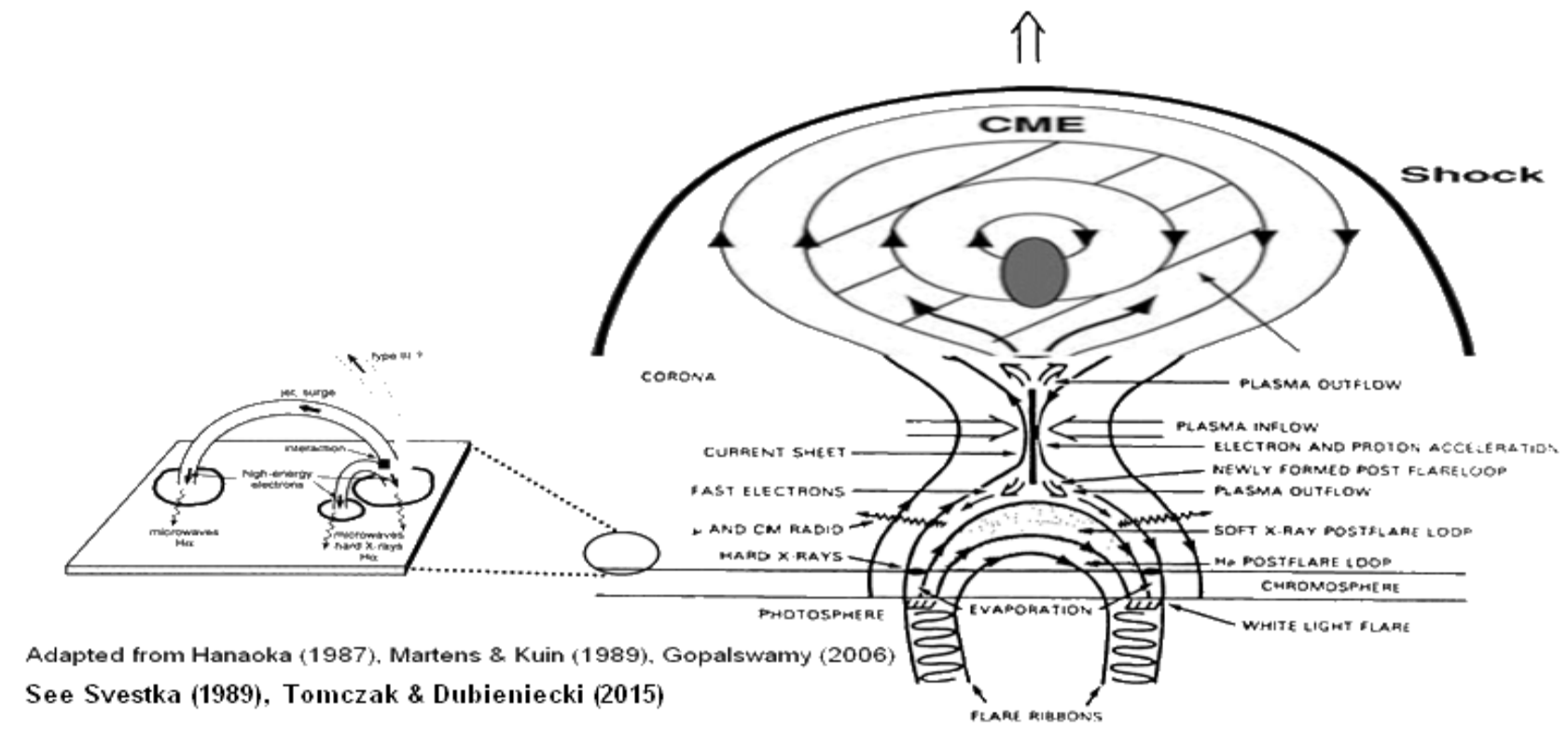
Р и с. 2. Соотношение между наблюдаемой $A_н$ амплитудой вспышечного поглощения радиоволн типа ППШ и амплитудой $A_р$, рассчитанной по данным о радиовсплесках, за период 1970–1977 гг. [9, 25]

Р и с. 3. Корреляция между наблюдаемой $J_н$ и рассчитанной $J_р$ по радиовсплескам максимальной интенсивностью потока с $E > 10$ МэВ для событий за 1970–1980 гг., удовлетворяющих критерию протонности (см. [8, 28])

Импульсные, компактные (confined) вспышки. Локальное пересоединение петель в нижней короне.

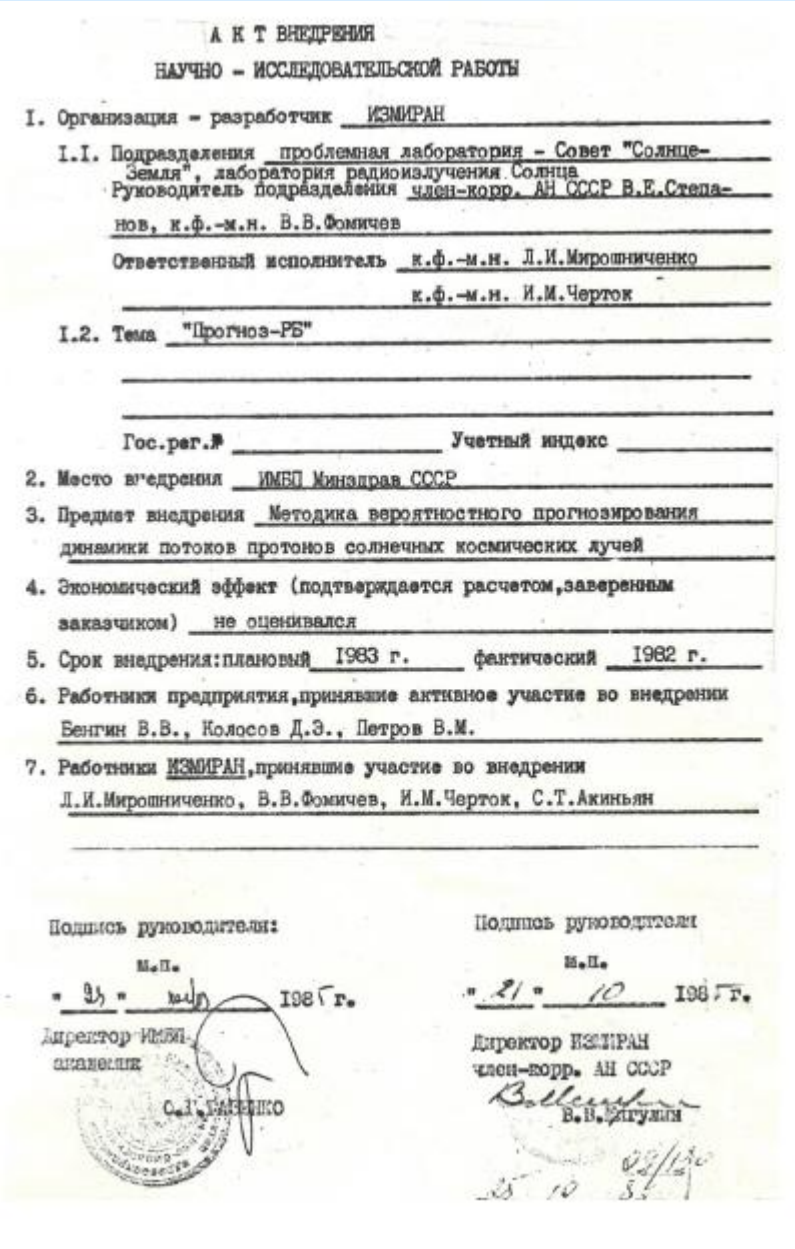
Long Duration Events (LDE) Эруптивные вспышки с Coronal Mass Ejections (CMEs) и длительным постэруптивным энерговыделением.

(Švestka, 1989; обзор Fletcher *et al*., 2011)



Adapted from Hanaoka (1987), Martens & Kuin (1989), Gopalswamy (2006)

See Svestka (1989), Tomczak & Dubieniecki (2015)



А К Т ВНЕДРЕНИЯ

НАУЧНО – ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

I. Организация – разработчик ИЗМИРАН

I.I. Подразделения проблемная лаборатория – Совет "Солнце-Земля", лаборатория радиоизлучения Солнца
Руководитель подразделения член-корр. АН СССР В.Е.Степанов, к.ф.-м.н. В.В.Фомичев

Ответственный исполнитель к.ф.-м.н. Л.И.Мирошниченко
к.ф.-м.н. И.М.Черток

I.2. Тема "Прогноз-РБ"

Гос.рег.№ _____ Учетный индекс _____

2. Место внедрения ИМБП Минздрав СССР

3. Предмет внедрения Методика вероятностного прогнозирования динамики потоков протонов солнечных космических лучей

4. Экономический эффект (подтверждается расчетом,заверенным заказчиком) не оценивался

5. Срок внедрения:плановый 1983 г. фактический 1982 г.

6. Работники предприятия,принявшие активное участие во внедрении Бенгин В.В., Колосов Д.Э., Петров В.М.

7. Работники ИЗМИРАН,принявшие участие во внедрении Л.И.Мирошниченко, В.В.Фомичев, И.М.Черток, С.Т.Акиньян

Подпись руководителя:
М.П.
"23" мая 1983 г.
Директор ИМБП академик
С.Г.Гиппенко

Подпись руководителя
М.П.
"21" 10 1983 г.
Директор ИЗМИРАН
член-корр. АН СССР
В.В.Зигуллин

Акт внедрения методики ИЗМИРАН

в Институте медико-биологических проблем (ИМБП)

Обеспечение радиационной безопасности пилотируемых космических полётов

Полёты самолётов по полярным трассам

Коротковолновая радиосвязь в высоких широтах (ППШ)

ОБЩИЙ ВЫВОД

Методика ИЗМИРАН не потеряла свою актуальность и может/должна использоваться при реальных прогнозах

Review of solar energetic particle models.
Whitman, K., Egeland, R., Richardson, I. G., Allison, C., Quinn, P., Barzilla, J., and about 100 other co-authors
Adv. Space Res. **2023** in press. 82 p.
https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0273117722007244

Radio astronomical tools for the study of solar energetic particles.
I. Correlations and diagnostics of impulsive acceleration and particle propagation.
K.-L. **Klein**
Front. Astron. Space Sci. Volume 7, id.105 **2020**
https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspas.2020.580436/pdf

Radio astronomical tools for the study of solar energetic particles.
II.Time-extended acceleration at subrelativistic and relativistic energies.
K.-L. **Klein**
Front. Astron. Space Sci. Volume 7, id.93 **2020**
https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspas.2020.580445/pdf

Спасибо за внимание