

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ

**Богод В.М.**

***СПб Ф САО РАН, г. Санкт-Петербург, [vbog@sao.ru](mailto:vbog@sao.ru).***

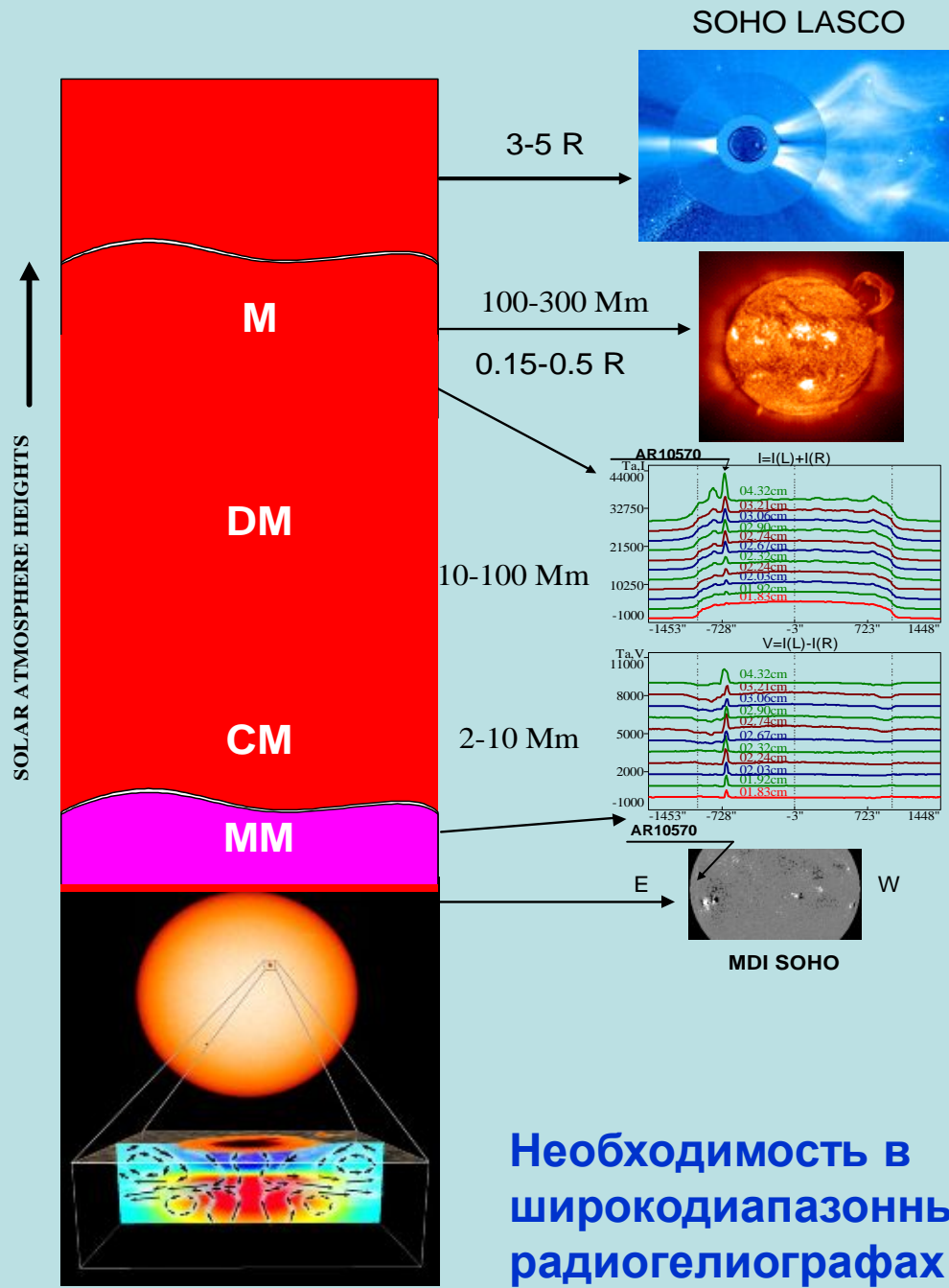
# План доклада

- ВВЕДЕНИЕ
- О месте радиоастрономического метода в исследованиях физики Солнца.
- О важности исследований Солнца на крупных радиотелескопах
- Интерферометры-радиогелиографы и большие рефлекторы
- О чувствительности и точности поляризационных измерений
- О ширине спектра и спектральном разрешении
- Об измерениях магнитного поля
- О перекрытии по времени и временном разрешении
- О многоволновом картографировании и координатных измерениях
  
- ТЕХНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ
- О спектрально-поляризационном комплексе РАТАН-600
- Достигнутые параметры
  
- ПЕРСПЕКТИВЫ.

<p>Современные крупные радиотелескопы для солнечных исследований</p>	Nobeyama Radioheliograph 1.7 cm and 0.8 cm
	SSRT 5,2 cm Ведутся работы по расширению диапазона пять волн в диапазоне 4-8 ГГц
	Nancay Radioheliograph метровый диапазон Увеличены базы до 2400 м (E) и 2350 ( S). Число волн увеличено до 10
	OVRO США 2-18 ГГц 40 частот
	PATAN-600 3-18 ГГц 80 частот Ведется перекрытия всего диапазона частот от 0.5 ГГц до 30 ГГц.
	Berkely-Illinois-Maryland Millimeter Array, США 3мм - эпизодически
	VLA (EVLA), WSRT, GMRT, PT-22 и 100 м зеркало в Бонне – эпизодически
Проекты	FASR–Frequency Agile Solar Radiotelescope USA The Chinese Spectral Radioheliograph

# Требования к радионаблюдениям

Идеальный радиотелескоп должен измерять  $I(f, x, y, t)$  &  $V(f, x, y, t)$  с очень высоким разрешением по  $\Delta f$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta t$  по всему Солнцу, по всему спектру частот, с малыми шумами и высоким динамическим диапазоном в неограниченном временном интервале.



Схематическое  
расположение  
слоев генерации  
микроволнового  
излучения

Необходимость в  
широкодиапазонных спектрографах и  
радиогелиографах

# Сравнительные параметры крупных радиотелескопов



Тип крупного Р/Т	NRH	ССРТ	OWRO	ПАТАН	FASR
Простр. разрешение $\Delta\theta_{x,y}$	10" x 10"	15"-26"	9" x 60"	225/f(GHz) 15" x 15" на волне 2см	20/f (GHz) " 1-100"
Чувствительность по потоку $\Delta F$ s.f.u.		0.2	1	0.001	1.0
Чувствительность по V $\Delta P/I$ (%)	1	5	<10	<0.1-0.03	<5
Диапазон частот $f$ , GHz	17.6	5.76 4.5-9 ГГц на 5 волнах	1-18 40 частот последоват. анализ	0.9 – 16.4(0.5-100) 80 частот Параллельный анализ	0.3-30
Частотное разрешение $\Delta f/f$ (%)	-	-	2.5 %	1%	1-3%
Длительность наблюдений $\Delta t$ (hours)	7	6-11 час	7	4	7
Динамический диапазон D	1000	600	600	100000	1000
Временное разрешение	1 карта/0.02 сек	14 мсек 3 min	10 мсек	4 мин сканы 1 мсек регистрация	< 1 sec
Чувствительность по яркостной температуре		1000K		100K	1000K

# Проблемы крупных радиотелескопов для исследования Солнца.

## Трудности сочетания предельных параметров

Решения - поиск компромиссов в достижении

- Высокой чувствительности и большого динамического диапазона,
- высокого 2-D разрешения и широкого поля зрения,
- широкодиапазонности и высокого частотного разрешения,
- широкого перекрытия по времени и высокого временного разрешения.

## Интерферометры.

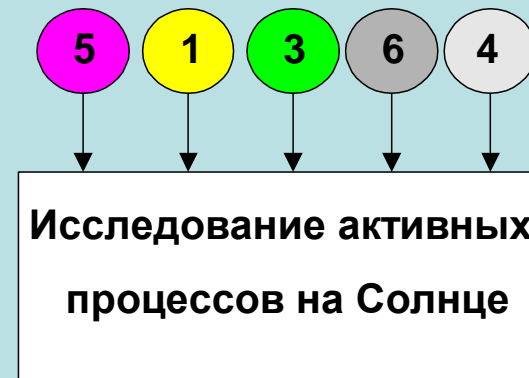
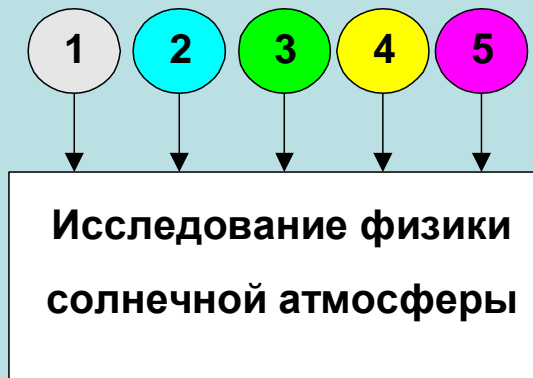
Плюсы	Минусы
1. Высокое пространственное разрешение	1. Трудности в многоволновости
2. Картографирование	2. Низкая чувствительность по $V$
3. Длительное сопровождение	3. Последовательный анализ

## Рефлекторные системы

Плюсы	Минусы
1. Многоволновость	1. Умеренное пространственное разрешение
2. Высокая чувствительность по $V$	2. Трудности картографирования
3. Высокий динамический диапазон	3. Трудности длительного сопровождения
4. Параллельный анализ	

# Параметры инструментов и задачи

- 1 Пространственное разрешение
- 2 Чувствительность
- 3 Спектр
- 4 Поляризация
- 5 Временные характеристики
- 6 Динамический диапазон





## ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Чувствительность крупных радиотелескопов-рефлекторов к обнаружению слабых радиоисточников:

$$\Delta T_A = \frac{\int T_B \cdot d\Omega}{\int A \cdot d\Omega} = T_B \cdot \frac{\Omega_i}{\Omega_a}$$

$$\Delta T_A = T_B \cdot \frac{\Omega_i \cdot S_{eff}}{\lambda^2}, \text{ где } S_{eff} \text{ - площадь зеркала.}$$

То для заданных  $\lambda$ ,  $\Delta T_A$ ,  $T_B$ , можно записать следующую таблицу:

Для волны 2 см

$\Delta T_a$ (K)	$\Omega_a$	$T_B$ (K)	$\Omega_i$ ["] <sup>2</sup>
10 K	17" x 15" = 15300 ["] <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>	53"
10 K	15300 ["] <sup>2</sup>	10 <sup>5</sup>	5.3"
10 K	15300 ["] <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup>	0.53"

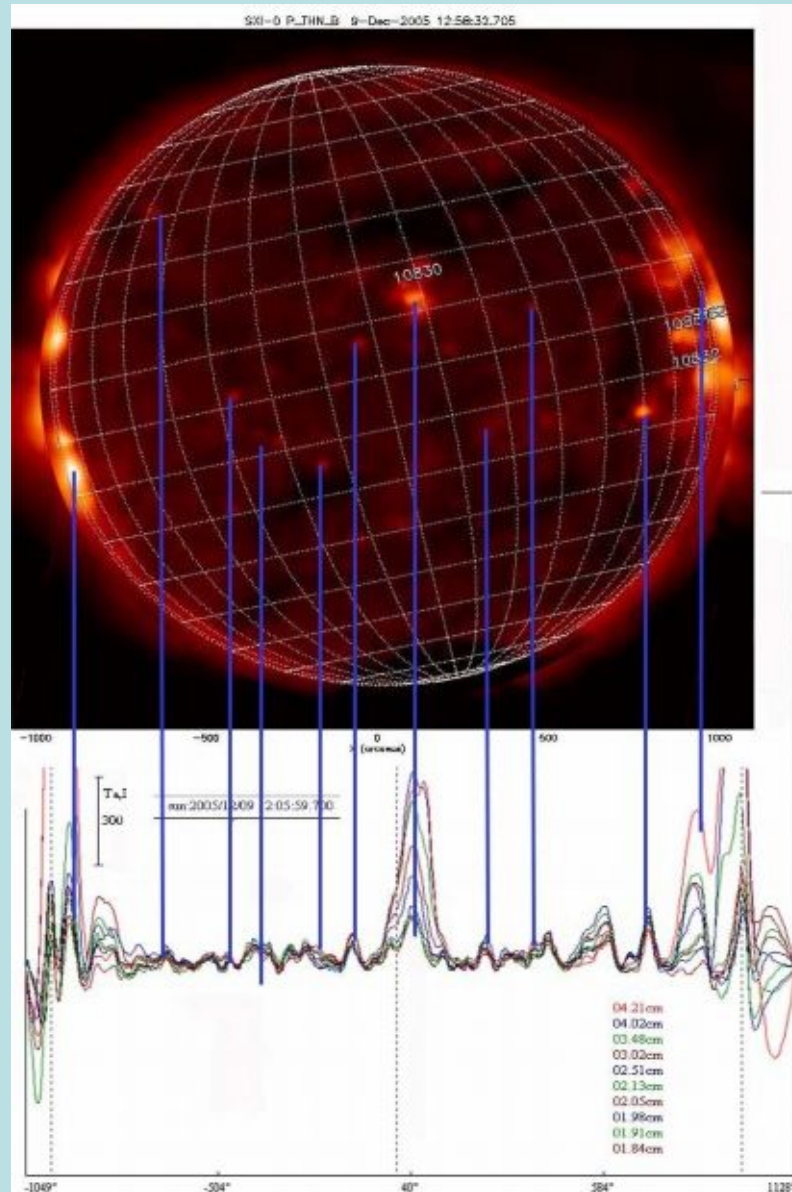
Яркие источники малых угловых размеров могут быть обнаружены при наблюдениях с широкой диаграммой. Для задачи их отождествления могут быть применимы другие параметры, такие как высокая координатная точность и многочастотные наблюдения.

## ВЫСОКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПО ПОТОКУ ИЗЛУЧЕНИЯ

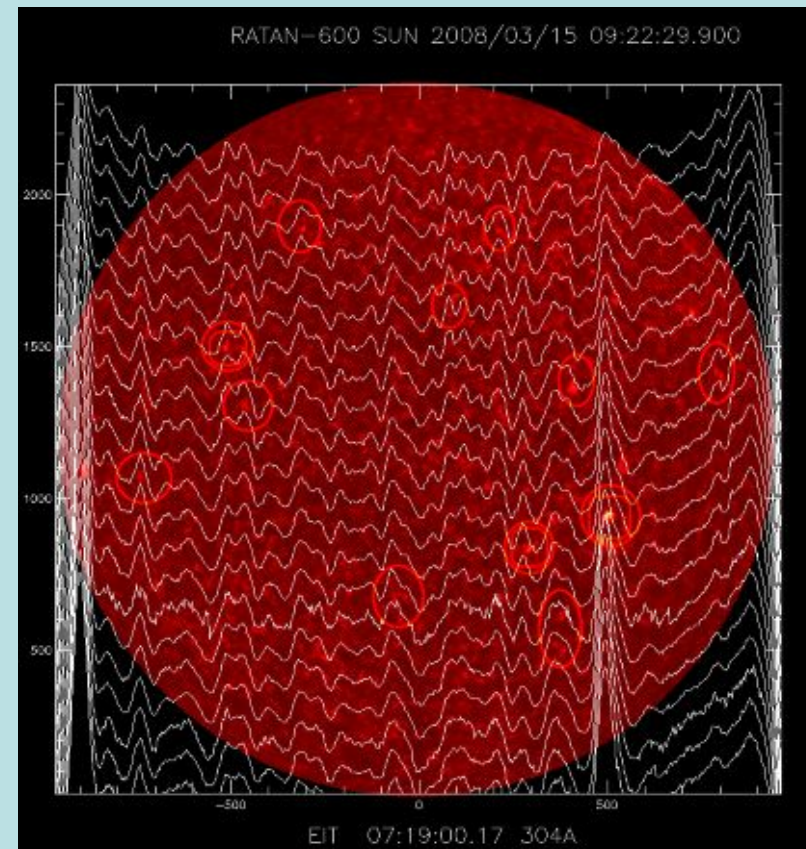
1. Проблемы нагрева солнечной короны, микровсплески и нановсплески
2. Структура “спокойной” солнечной атмосферы
3. Зарождение активности
4. Слабые магнитные поля и их 3-D распределение
5. Источники генерации солнечного ветра

**На РАТАН-600 достигнута чувствительность по плотности потока излучения  $\Delta F \approx 0.001 \text{ s.f.u.}$ , что является предельным параметром.**

# Мелкомасштабная структура спокойного Солнца (радиогрануляция)



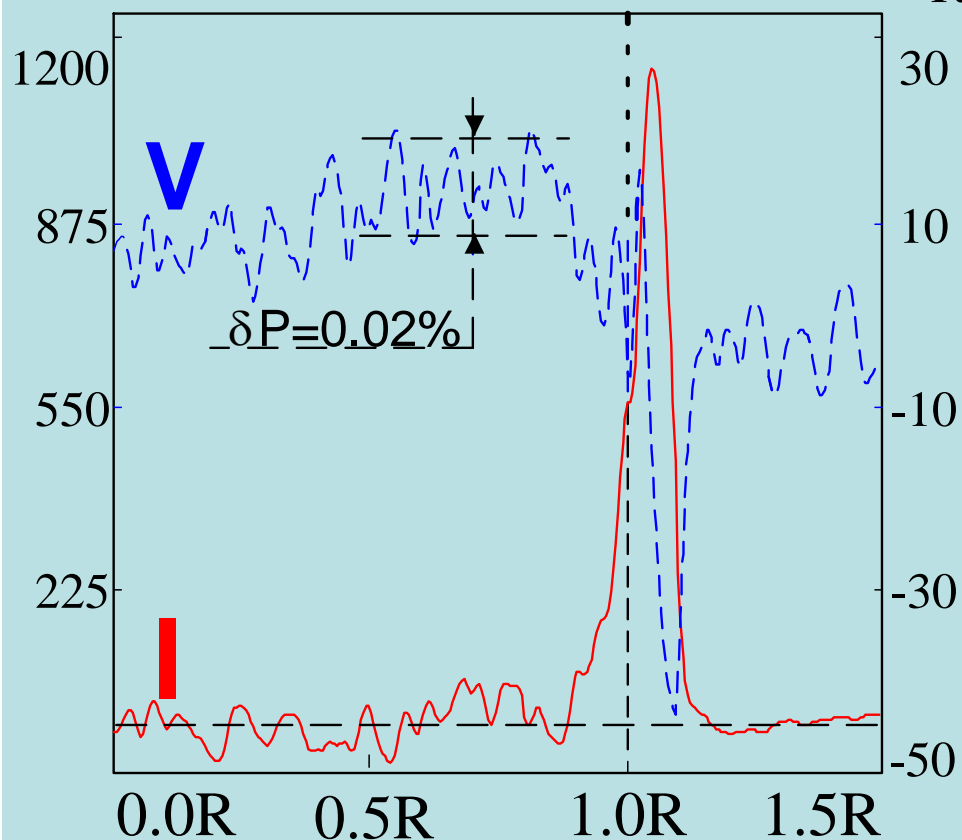
**Задачи:**  
Модели атмосферы,  
Структура спокойного Солнца,  
Зарождение АО



# Чувствительность по потоку излучения

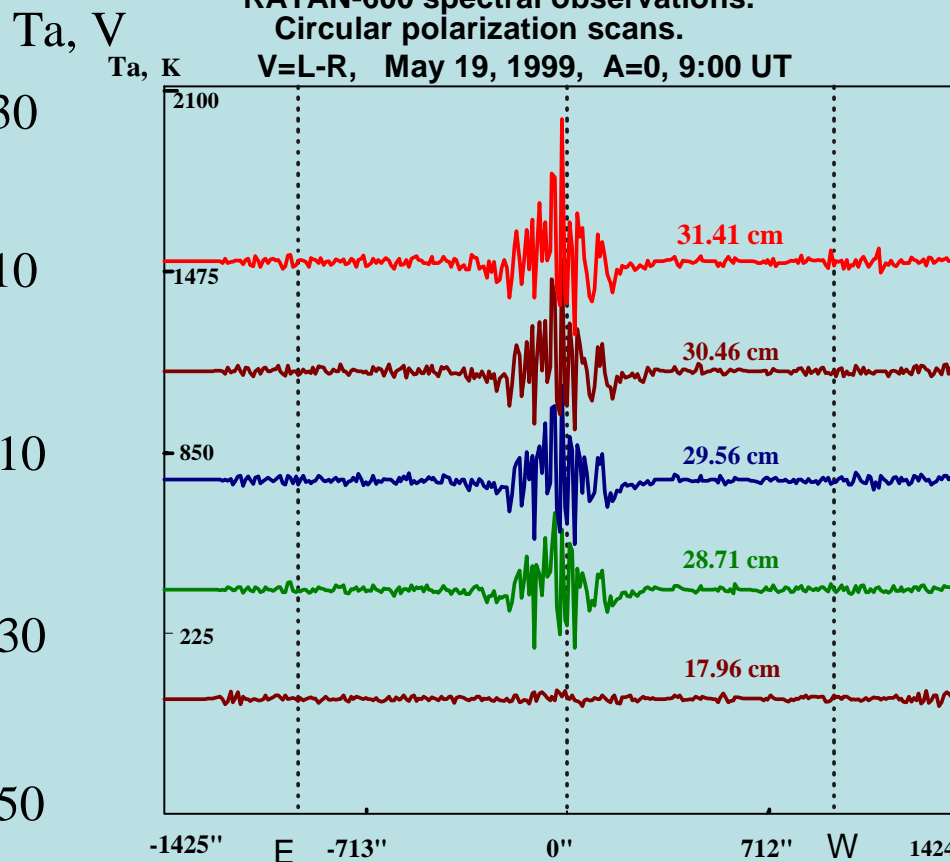
Реализация  $\Delta P \approx 0.02\%$  и  $\Delta F \approx 0.001 \text{ s.f.u.}$

Ta, I SUN: 2.11[cm]



Измерение поляризации протуберанца на лимбе

RATAN-600 spectral observations.  
Circular polarization scans.  
V=L-R, May 19, 1999, A=0, 9:00 UT



Измерение потока микровсплесков

## Спектральные измерения в широком диапазоне волн (параметры Стокса I и V)

- 1. Природа генерации, накопления и переноса энергии.
- 2. Физическая природа отдельных солнечных образований
- 3. Физические условия в местах зарождения предвспышечной плазмы. Методы “prediction”.
- 4. Природа активности, в т.ч. вспышечной
- 5. 3-D высотная структура магнитного поля

**На РАТАН-600 реализуется программа многооктавного перекрытия спектра от 50 см до 3-4 мм, что вне возможностей существующих инструментов.**

# Особенности спектральных измерений солнечного радиоизлучения.

В солнечной атмосфере широко распространены и являются общепринятыми для диагностики физических условий следующие механизмы :

- **Плазменное излучение**
- **Тепловое излучение Bremsstrahlung**
- **Циклотронное излучение на нижних гармониках гирочастоты и гиротронное на высоких,**
- **Циклотронное мазерное излучение**
- **Переходное излучение плазмы и др.**

Радиочастотный спектр в диапазоне от мм до метровых волн богат диагностическим потенциалом физических условий солнечной плазмы, потому что две естественные частоты солнечной атмосферы - плазменная частота электронов и циклотронная частота – часто имеют один порядок с радиочастотой.

Отмечены тонкие спектральные особенности спектра:

В диапазоне 2-5 см ( смена доминирующих механизмов теплового и циклотронного), [Bogod et al, 2003]

В диапазоне 20-30 см ( смена доминирующих тепловых и нетепловых механизмов), [Yasnov et al, 2002]

В диапазоне метровых волн ( всплески разных типов),

В диапазоне мм волн ( связи высокоэнергичных электронов с параметрами радиовсплесков) [Croom, D. L.: 1971, ] [Chertok, I. M.: 1990]

# Магнитное поле

Измерения магнитного поля в короне весьма трудны и часто находятся вне возможностей оптических, EUV и рентгеновского диапазонов.

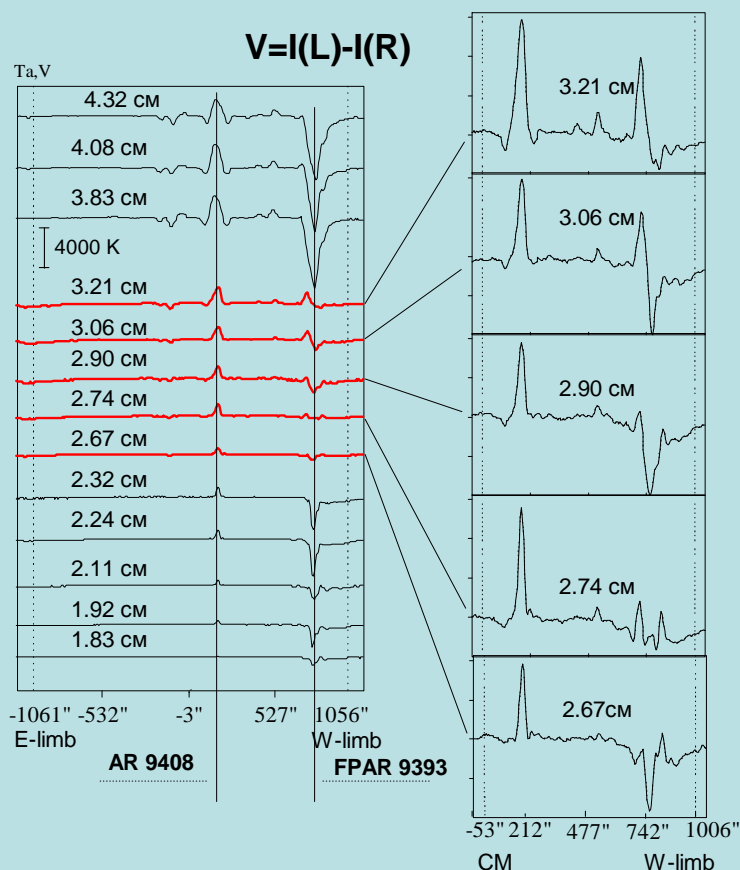
Радиоастрономический метод основан на поляризационных измерениях и вышеупомянутых механизмах и является прямым методом.

Спектрально-поляризационные наблюдения на РАТАН-600, используя механизм циклотронного излучения на нижних гармониках гирочастоты, дают информацию о магнитном поле АО и его структуре в широком интервале высот.

- Разрабатываются методы магнитографии [Ryabov et al., 1999, ] и радиотомографии [Grebinskiy et al., 2000 ]
- Методы измерения высотной структуры магнитного поля [ Bogod et al., 2008].
- Особенно важны мгновенные измерения степени поляризации во всем диапазоне волн от мм до м –волн, которые дают информацию о высотной структуре магнитного поля от нижних короны к дальней. И может быть основой для задач связанных с изучением переноса энергии в гелиосферу.
- **На РАТАН-600 достигнуты высокие точности измерения степени поляризации от 0.1 -0.02 % в многоволновых измерениях.**

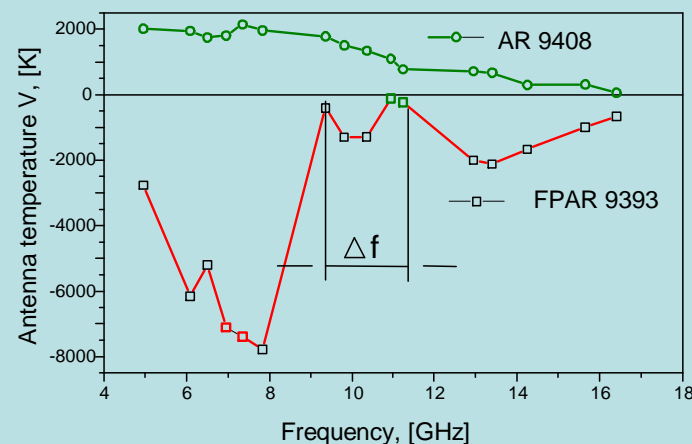


## Области микроволнового спектра с многократными инверсиями поляризации в активных областях, генерирующие вспышки



### Диагностика подготовительной фазы ВСПЫШКИ

В радиодиапазоне наблюдаются резкие частотные изменения структуры круговой поляризации в активной области за 1-5 дня до ВСПЫШКИ

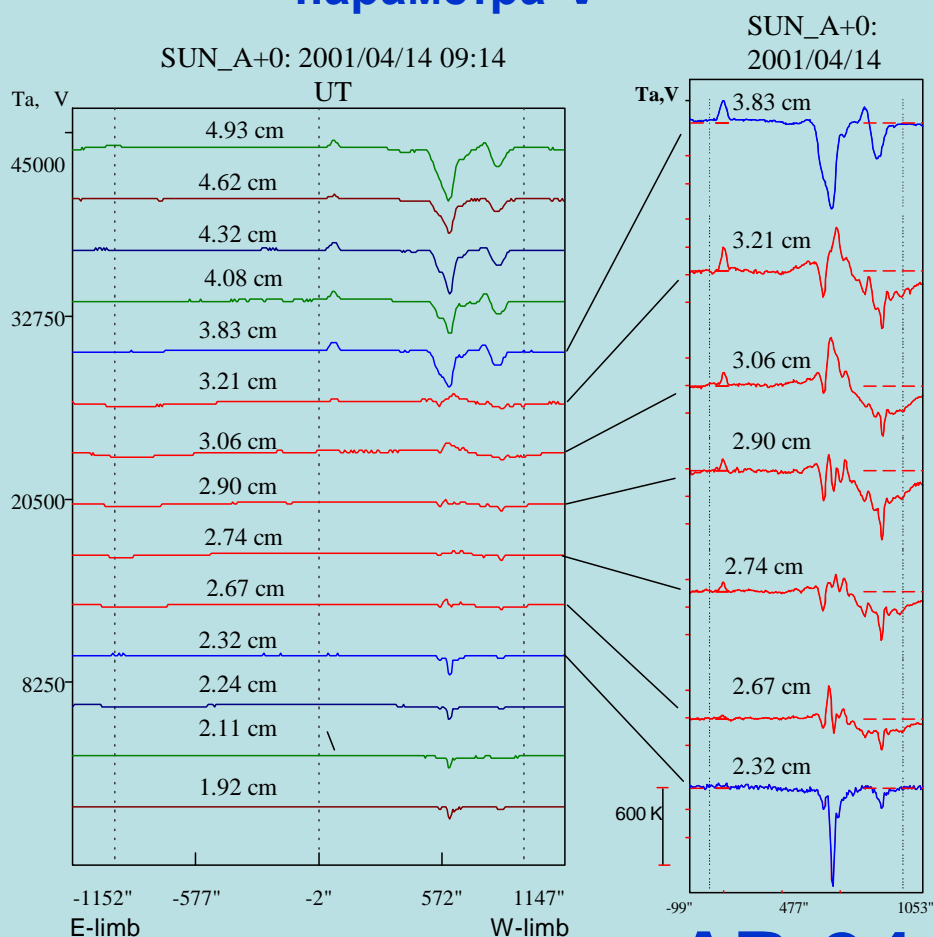


Демонстрация микроволнового спектра с низкой степенью поляризации для вспышечно активной области AR 9393. Слева для сравнения микроволновый спектр стабильной активной области AR 9408.



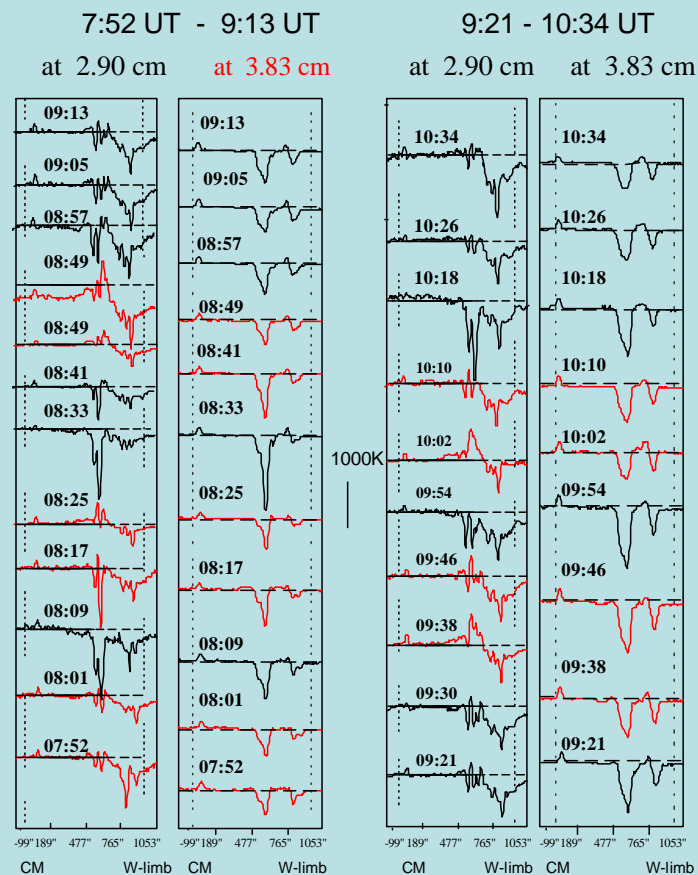
# Области микроволнового спектра с многократными инверсиями поляризации в активных областях, генерирующие вспышки

## Многоволновый скан параметра $V$



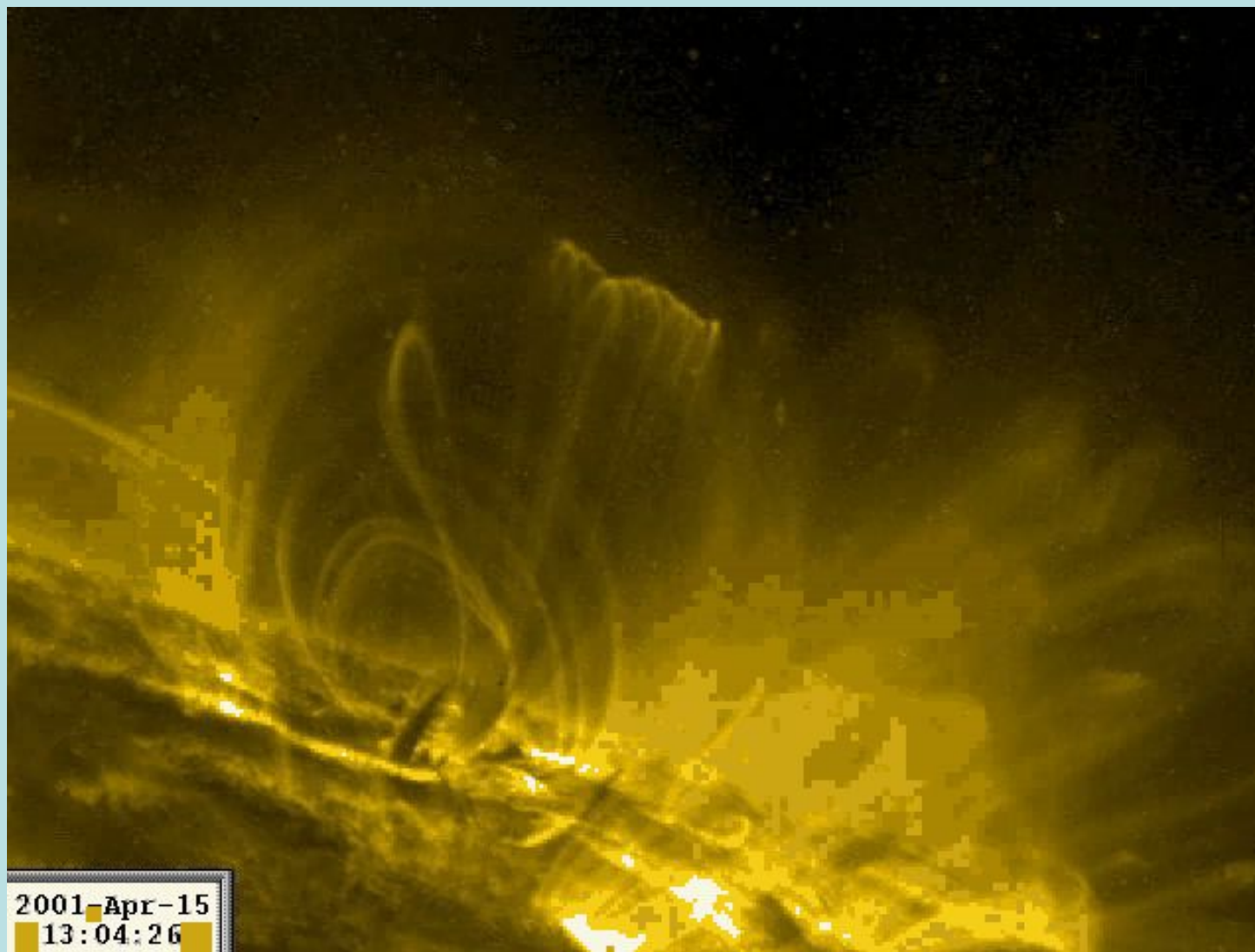
## Временные характеристики $V$

Evolution of AR 9415 during April 14, 2001



**AR 9415**

## Вспышка в АО 9415

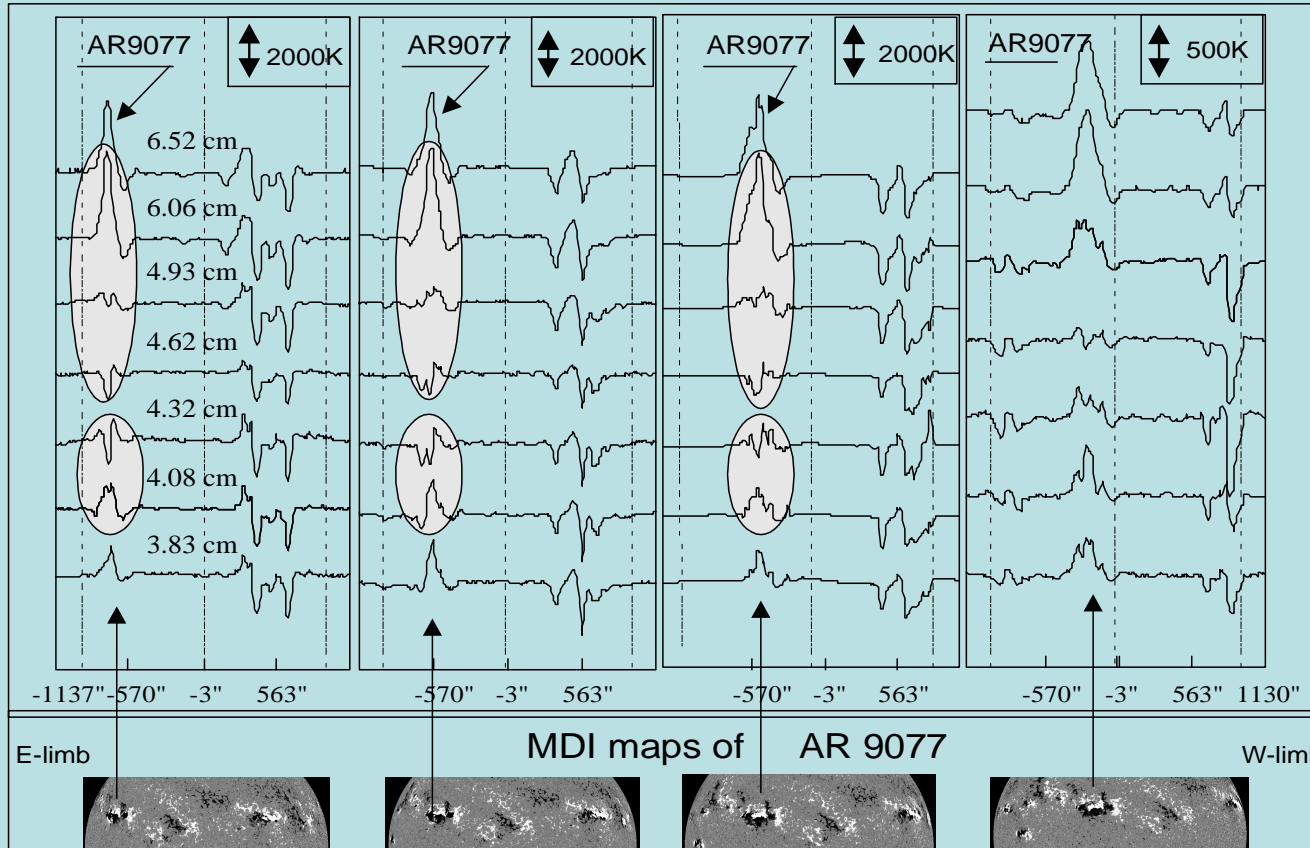


July 10, 2000, 9-19 UT

July 11, 2000, 9-19 UT

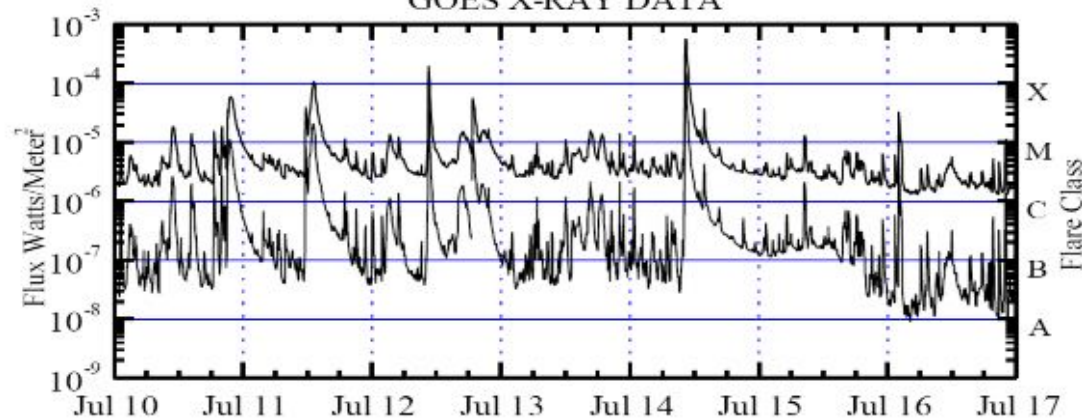
July 12, 2000, 9-19 UT

July 13, 2000, 9-19 UT

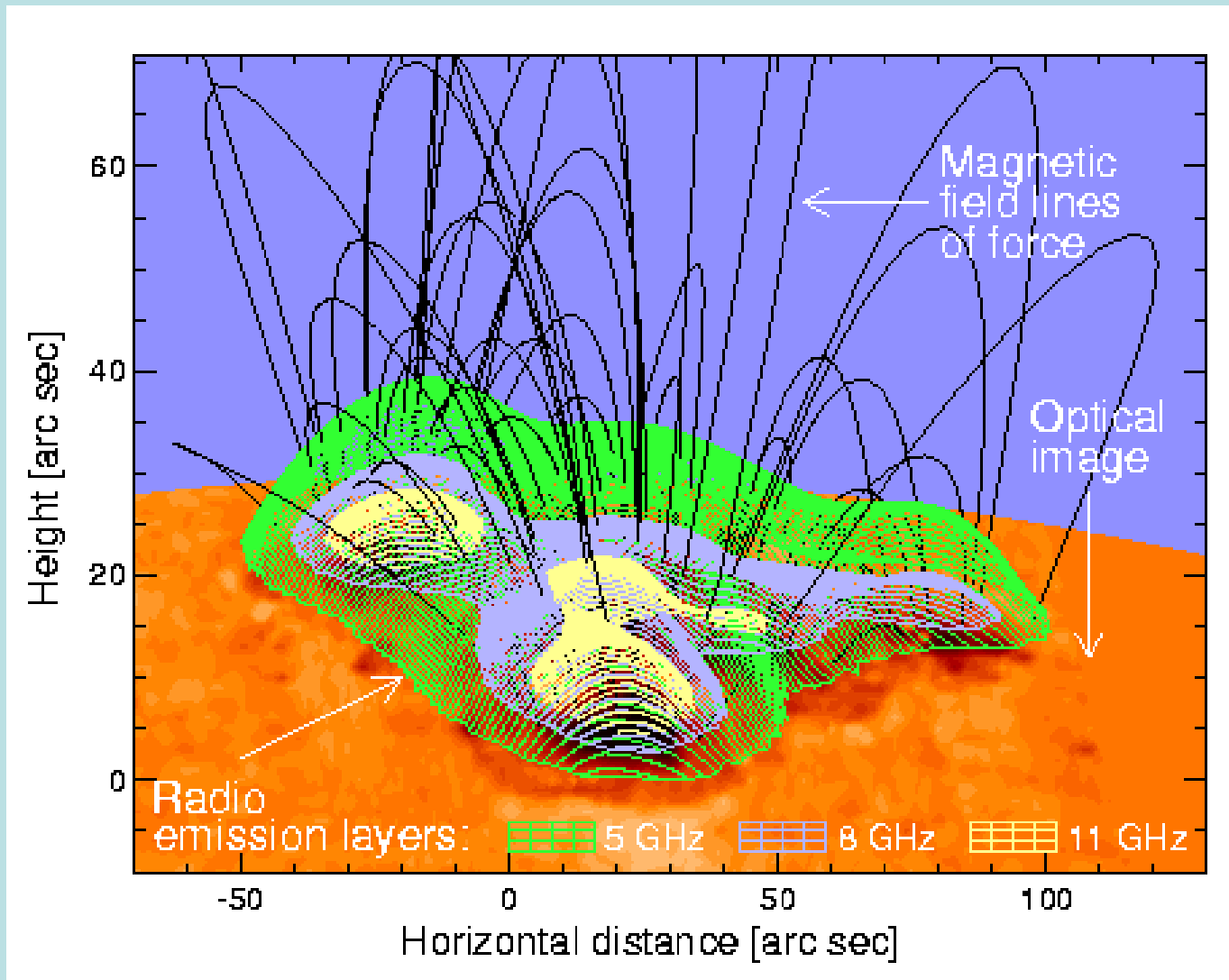


# Множественные инверсии во ВПАО

GOES X-RAY DATA



# Coronal Magnetic Fields



# Перекрытие по времени и временное разрешение

- Эти важные для Солнца параметры – наиболее трудны для РАТАН-600.
- Реализован метод многоазимутальных наблюдений на Южном секторе с Перископом. Сейчас доступны наблюдения в течение 4 часов вблизи местного полудня с временным разрешением 4 минуты.
- В ряде задач в дециметровом диапазоне реализованы многоволновые наблюдения с временным разрешением 0.0025 сек.

## МНОГОАЗИМУТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Прохождение мощной активной области в декабре 2006г по диску Солнца в период глубокого минимума его активности.

Sun: December 2006 Wavelength - 2.16cm

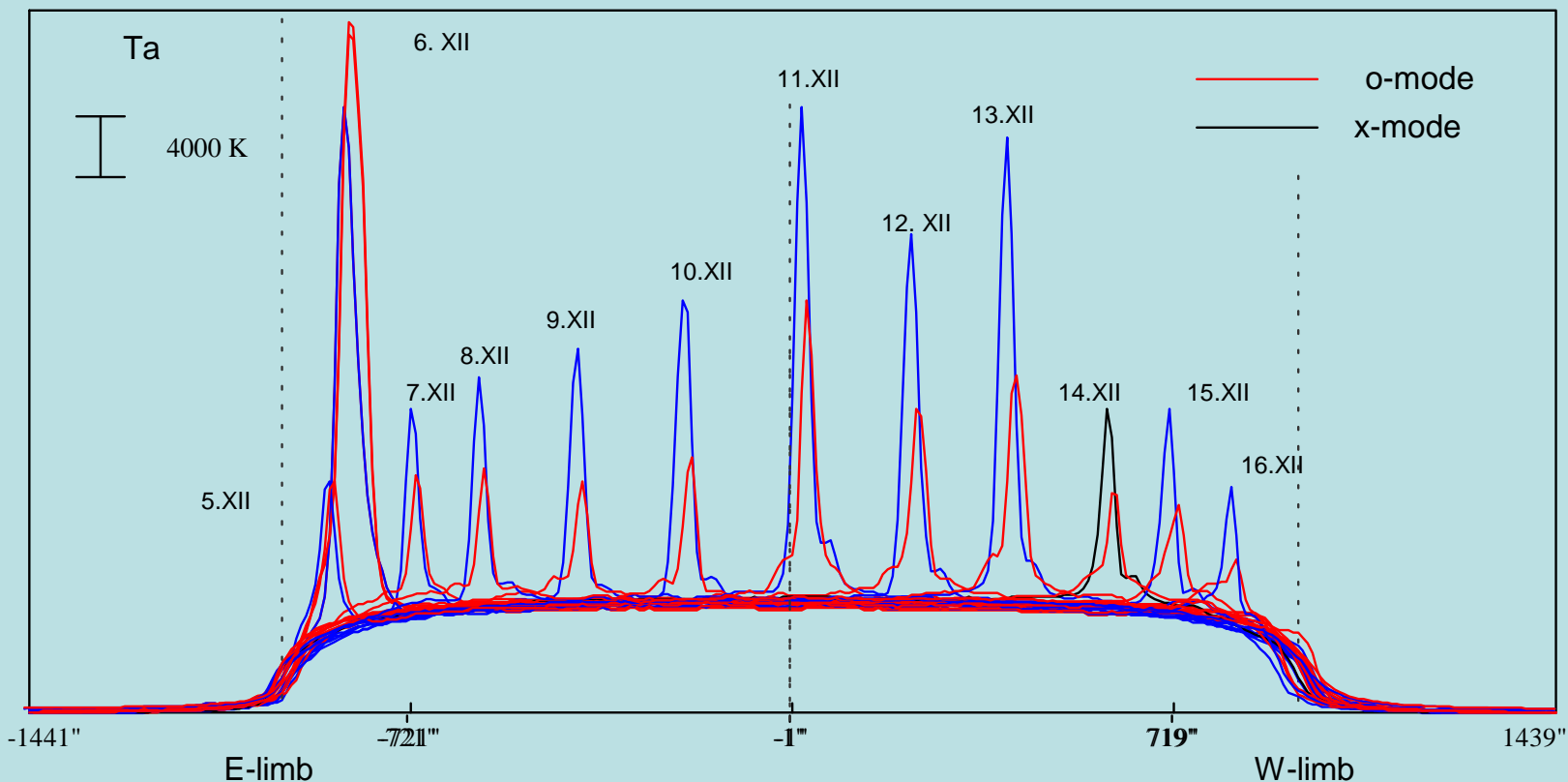


Рис.1 АО 10930 наблюдалась на диске с 5 по 17 декабря на 56 длинах волн в интенсивности и поляризации ежедневно в 5 азимутах. Здесь представлено наблюдение на одной волне 2.16 см в меридиане.

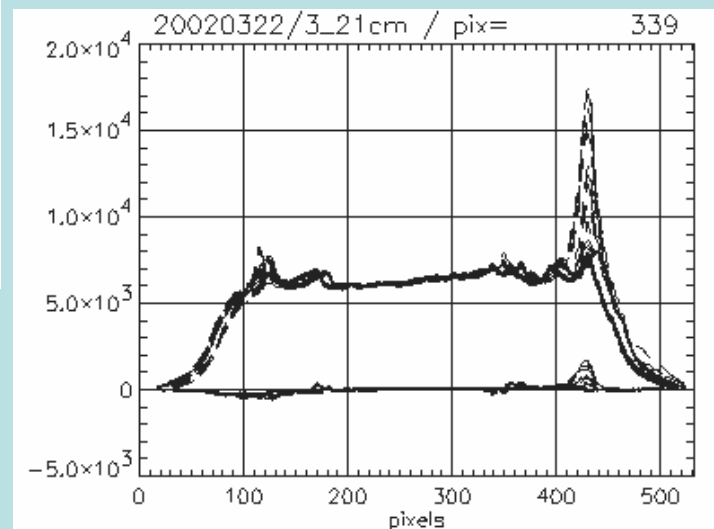
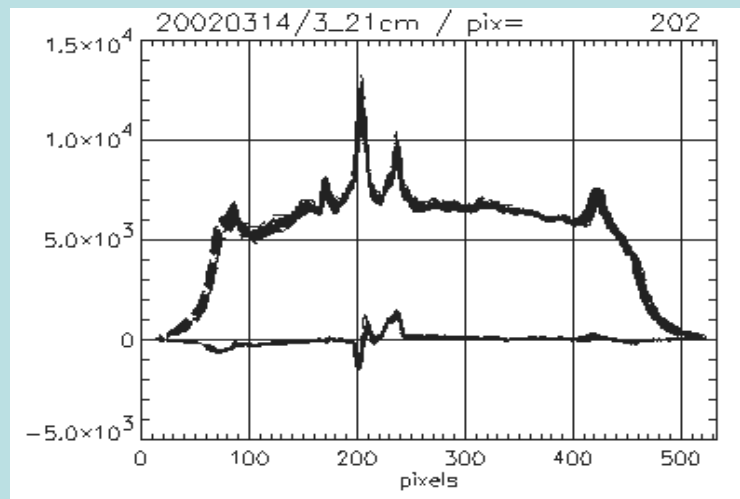
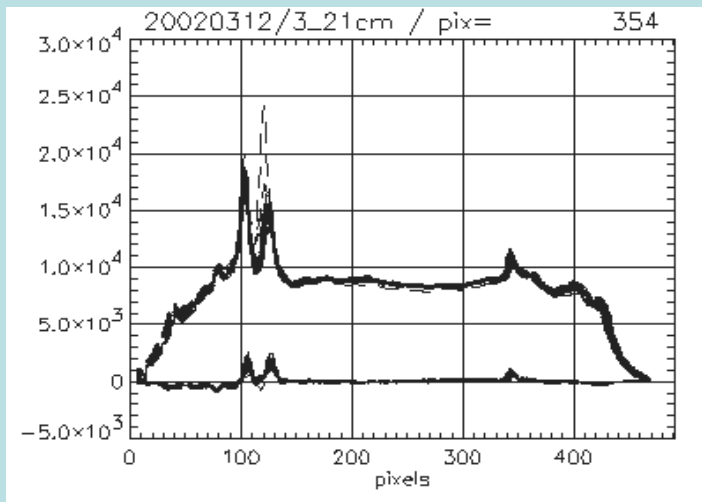
Красным цветом показана обыкновенная волна, синим – необыкновенная волна. На восходе видна смена знака поляризации.

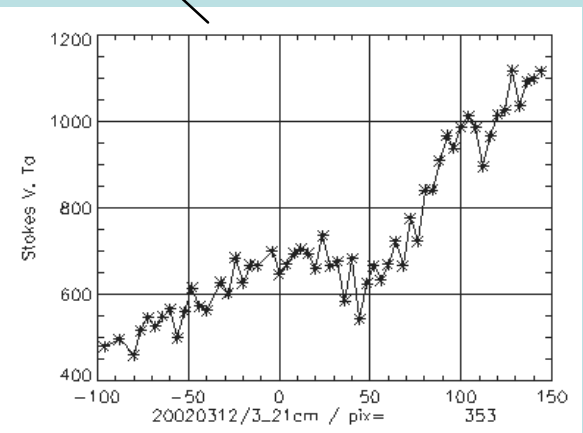
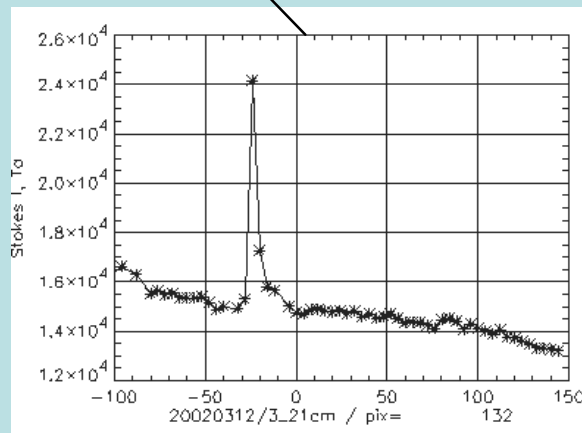
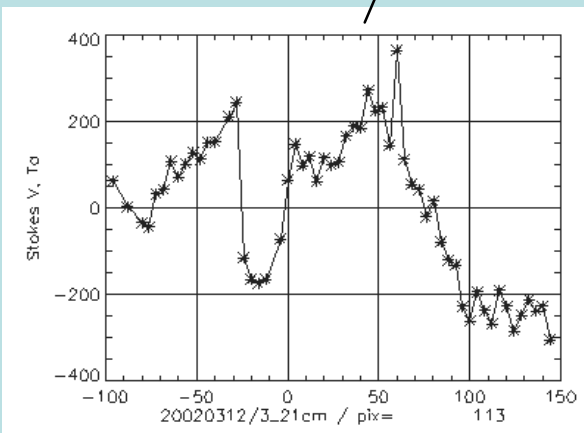
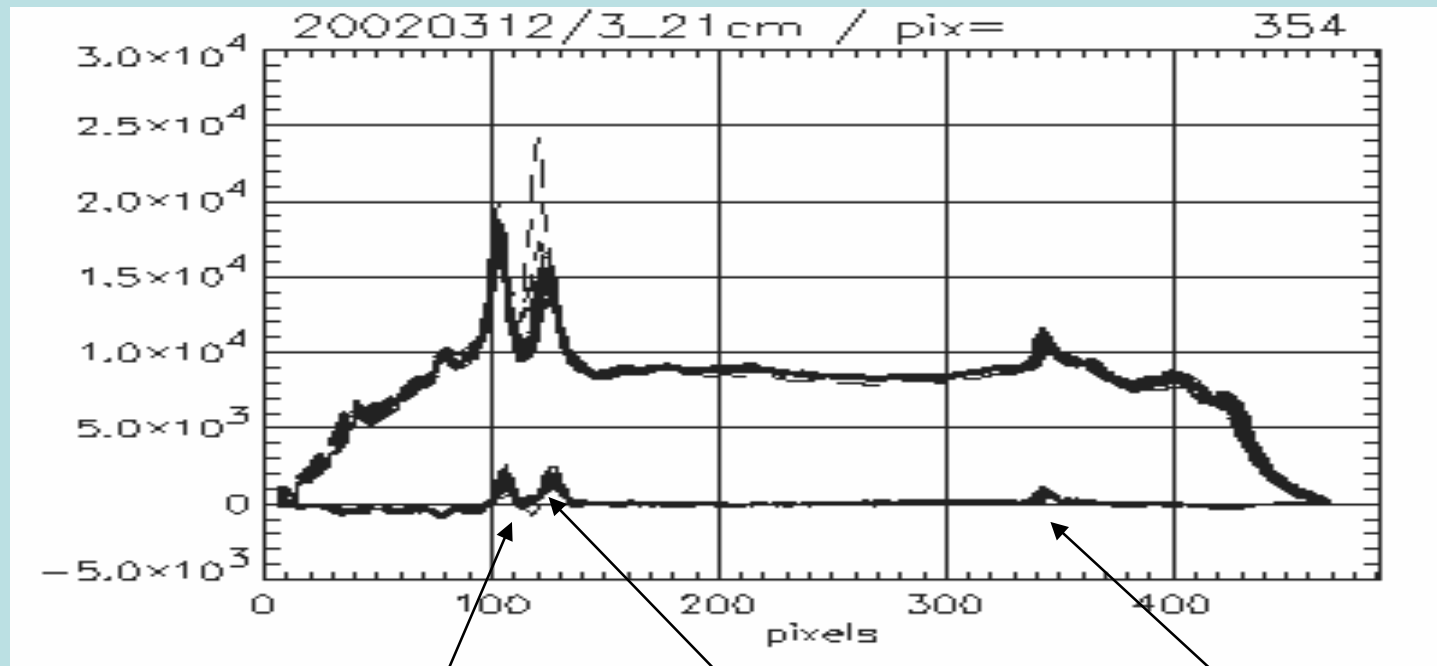
# МНОГОАЗИМУТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Примеры

Динамические характеристики  
активных областей

**Задачи:**  
**Природа активных**  
**областей,**  
**прогнозирование**  
**активности**

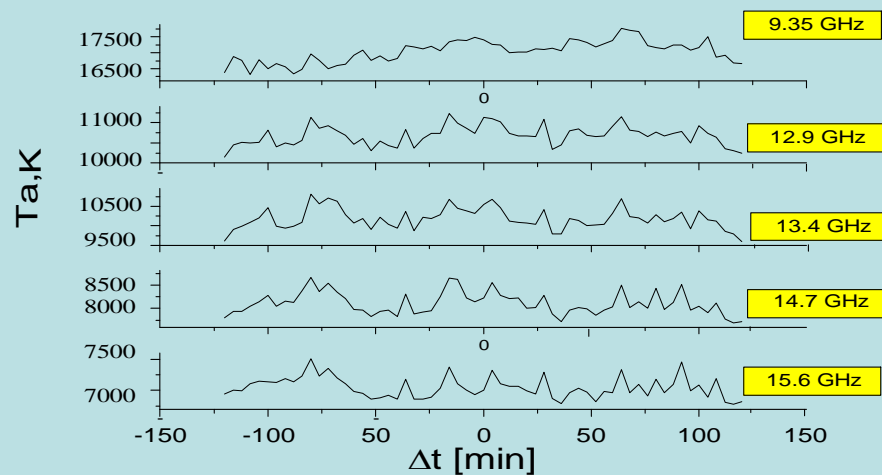




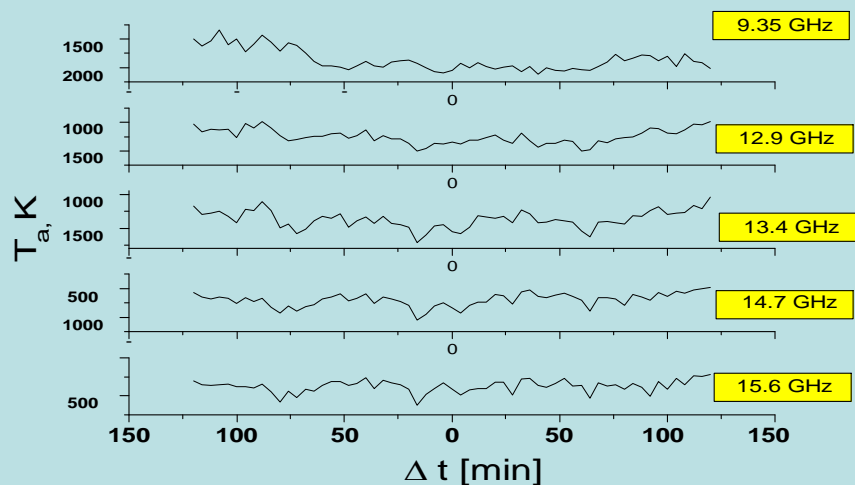


# МНОГОАЗИМУТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

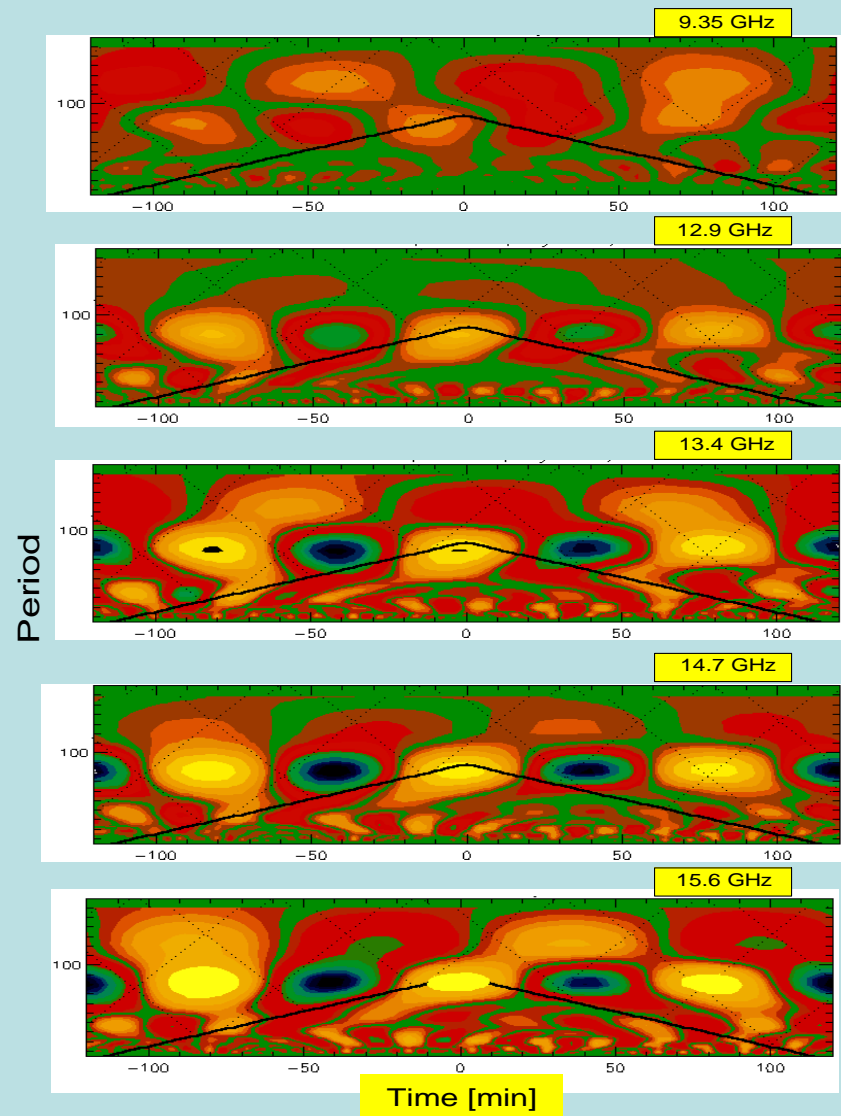
Time series,  $I=I(L)+I(R)$ , source AR 9866 (2)



Time series,  $V=I(L)-I(R)$ , source AR 9866 (2)

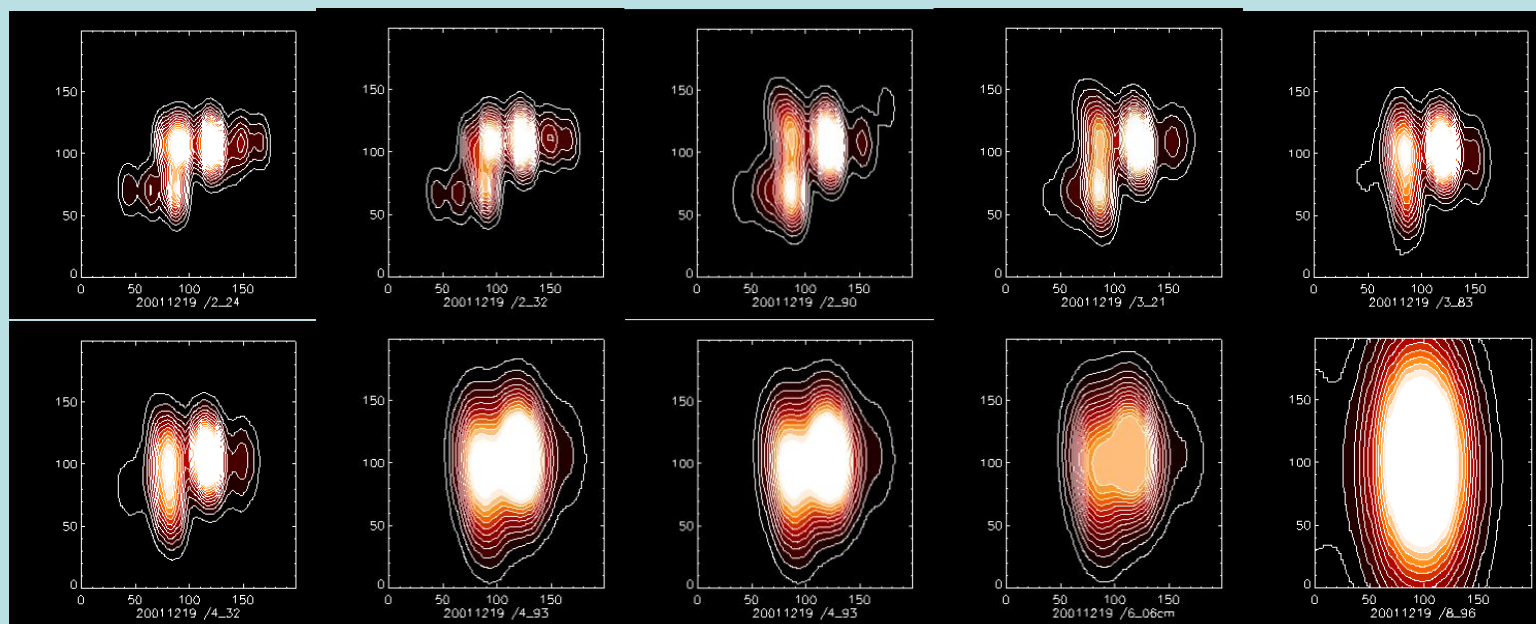


Wavelet spectrum (Magnitude)



# Многоволновое азимутальное картографирование

- На РАТАН-600 используются измерения поворота диаграммы радиотелескопа относительно радиоисточника при многоазимутальных наблюдениях.

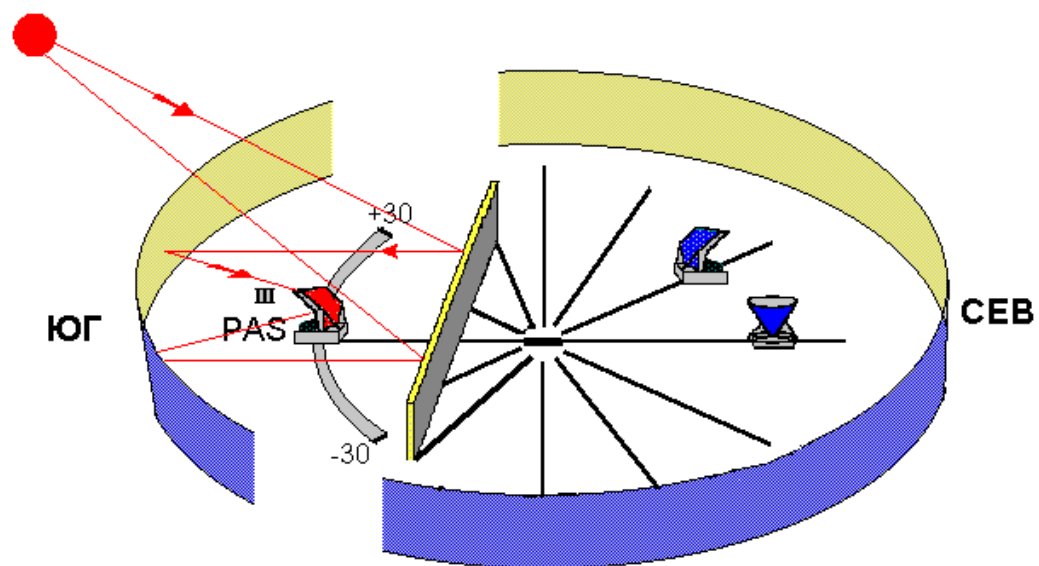


Карты активной области на длинах волн от 2.24 см до 9.0 см по азимутальным наблюдениям в системе Юг и Перископ

# Координатные измерения

- РАТАН-600 обладает высокими характеристиками для координатных измерений положений радиоисточников на диске Солнца. Разрабатываются методы высотных распределений магнитного поля над пятнами, в которых используются сопоставление с точными координатными измерениями на спутниках SOHO, TRACE и др. [Bogod et al., 2008].
- Точность координатных измерений на РАТАН-600 достигает 0.1 угл. сек ( измерено по орбите Меркурия)

# Техническая часть



# RATAN-600

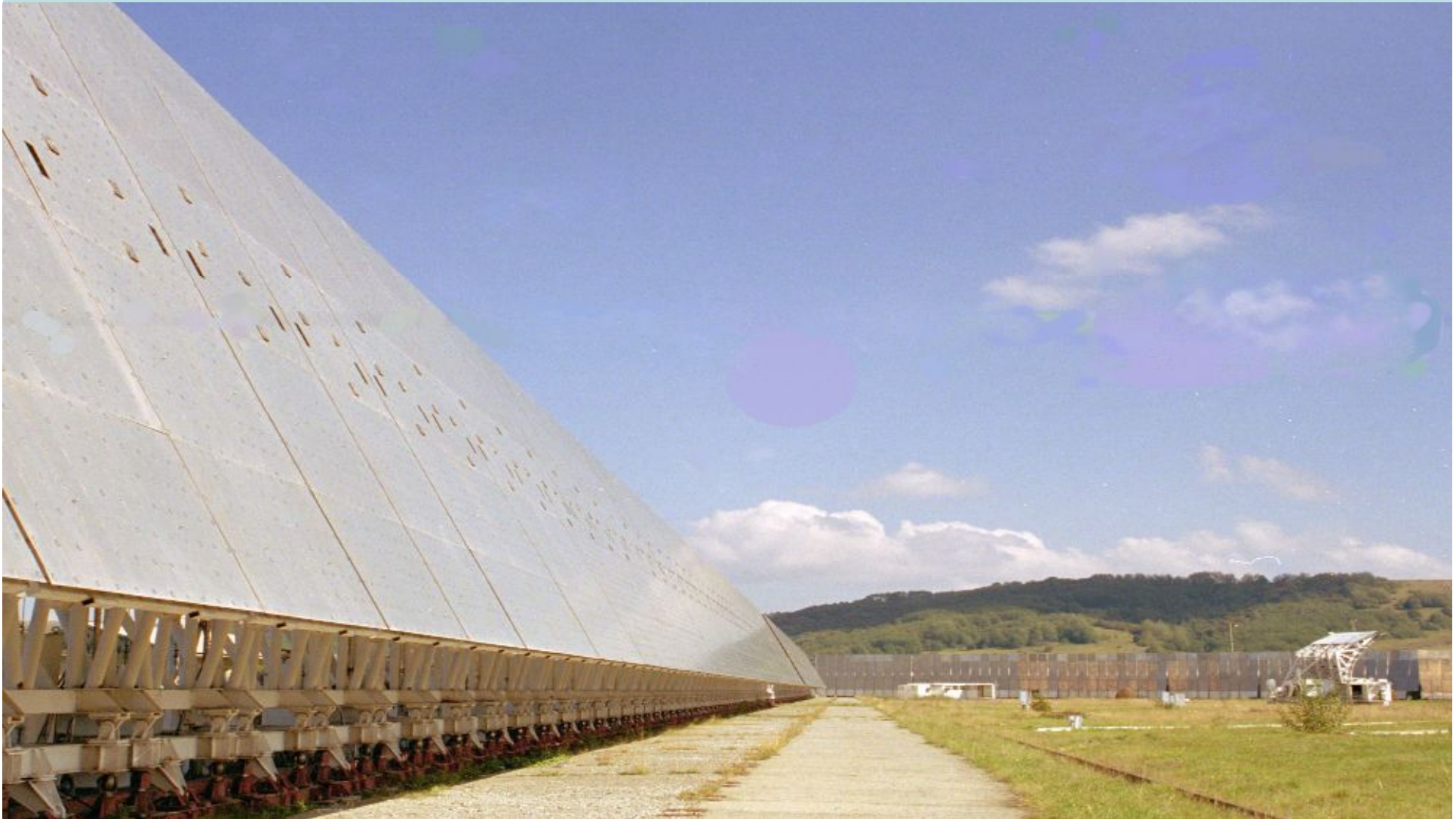
South sector with Periscope Mirror + Spectral-polarimetric complex high resolution (SPCHR)

- High flux sensitivity (0.01-0.001 s.f.u.),
- Wide frequency coverage (from 3 GHz to 18 GHz)
- Detail spectral analysis (1 % )
- High accuracy of polarization degree measurement ( about 0.1 - 0.03%)





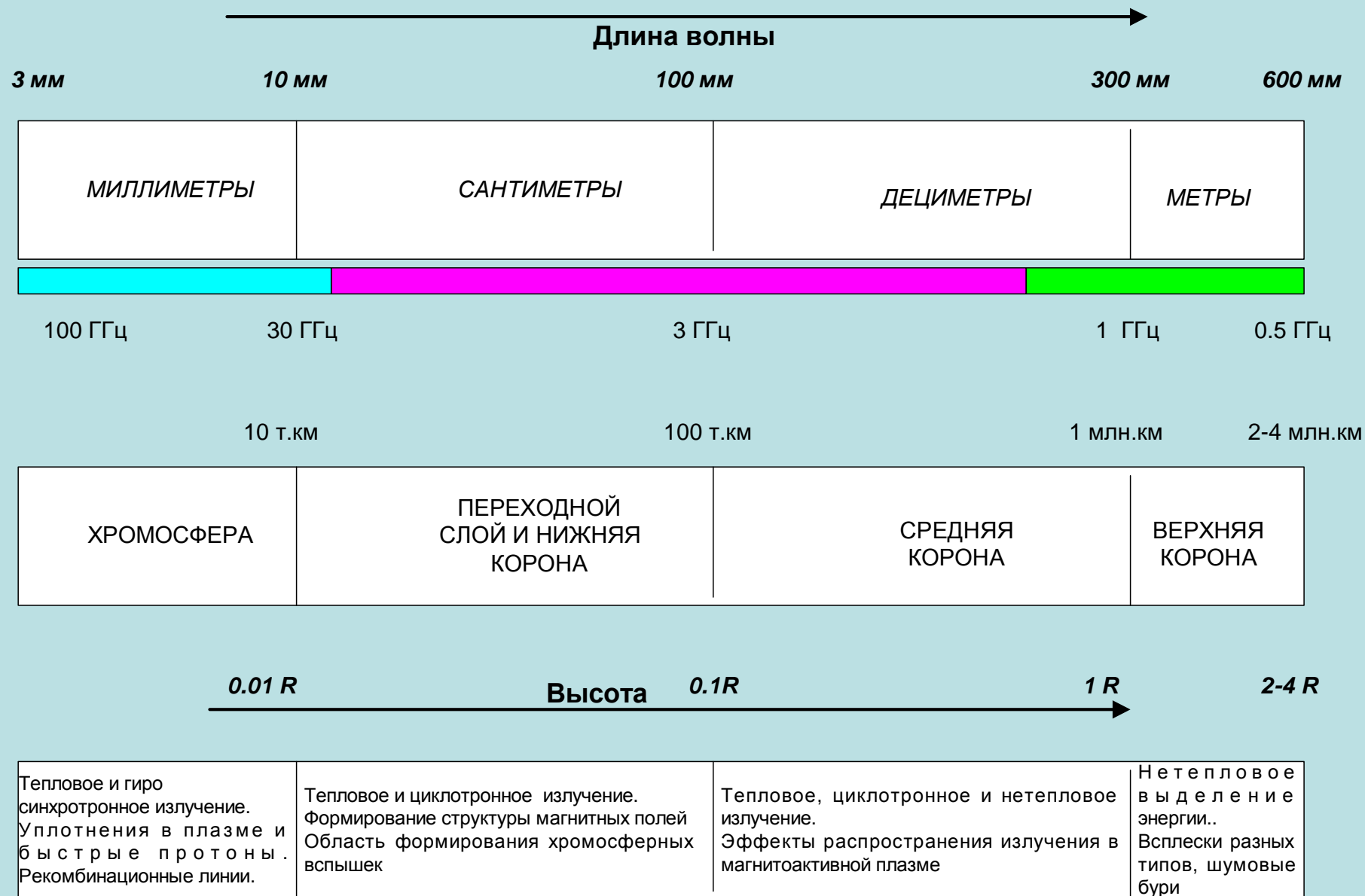
# RATAN-600 (South sector+ Periscope)



# Создание СПКВР (2005-2010гг.)

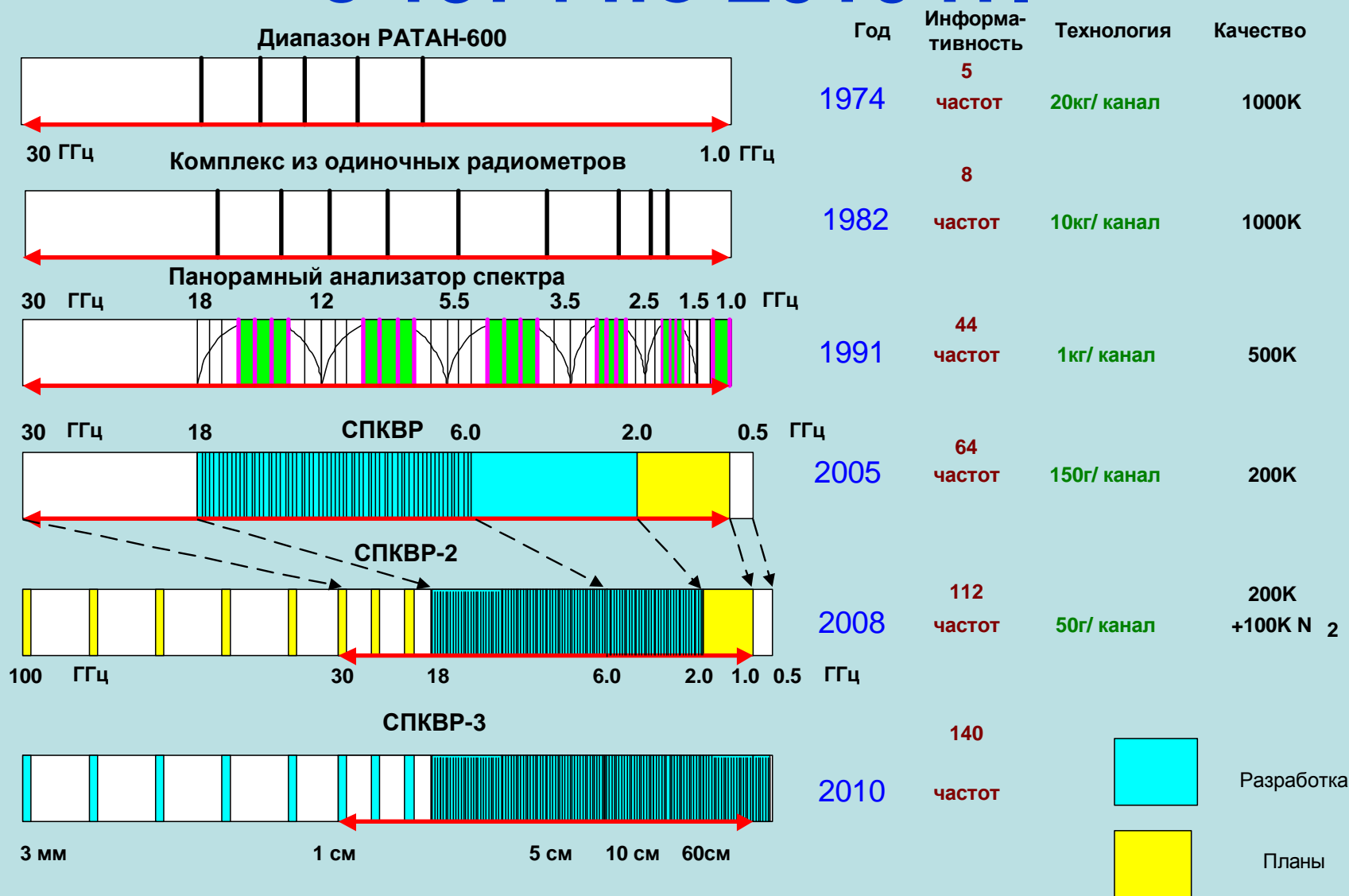
- Предложена концепция Спектрально-Поляризационного Комплекса Высокого Разрешения:
- На основе современных технических возможностей перекрыть весь диапазон радиотелескопа РАТАН-600 подробным частотным разрешением около 1% . При этом расширить рабочий диапазон радиотелескопа в длинноволновую область до 0.5 м и в коротковолновую область до 3 мм.
- **ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ**
- **1. Широкополосный излучатель с совмещенными поляризациями (линейными или круговыми) с малой зависимостью ширины диаграммы от частоты.**
- **2. Создание анализатора спектра с частотным разрешением около 1% в широком диапазоне частот с анализом I и V.**
- **3. Реализация высокого быстродействия в многоканальной системе регистрации.**
- **4. Реализация высоких требований по динамическому диапазону, по автоматическому выравниванию АЧХ и др.**

## Паспортный диапазон РАТАН-600





# Развитие солнечного комплекса с 1974 по 2010 гг.



## Основные параметры СПКВР-2:

1. Частотный диапазон: 3 ГГц – 18 ГГц
2. Число каналов: 80
3. Спектральное разрешение: 1% и 100 МГц
4. Скорость регистрации: 0.0025 сек/ 64 кан.
5. Шумовая температура: 300К
6. Динамический диапазон: > 100000
7. Межканальная развязка: > 20 дБ
8. Скорость переключения RH и LH поляризаций: 400 Гц.
9. Эллиптичность: (1-5)%
10. Ширина диаграммы рупоров во всем диапазоне: +- 60град.
11. Развязка между RH и LH поляризаций : > 20 db
12. Смещение фазовых центров для RH и LH: 25 мм

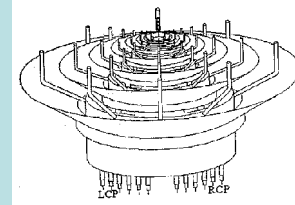
# Широкополосные входные облучатели

- Варианты:

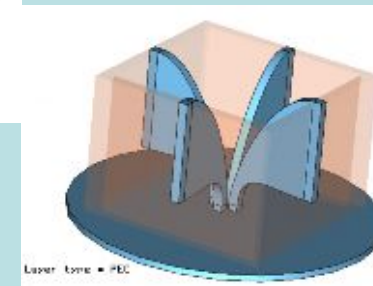
- Облучатели волноводного типа



- Облучатель конструкции Дикого В.Н. на резонаторах бегущей волны



- Облучатель Вивальди,



- Облучатели на цилиндрических излучателях.



- Облучатели на плоских двухзаходных спиралях,



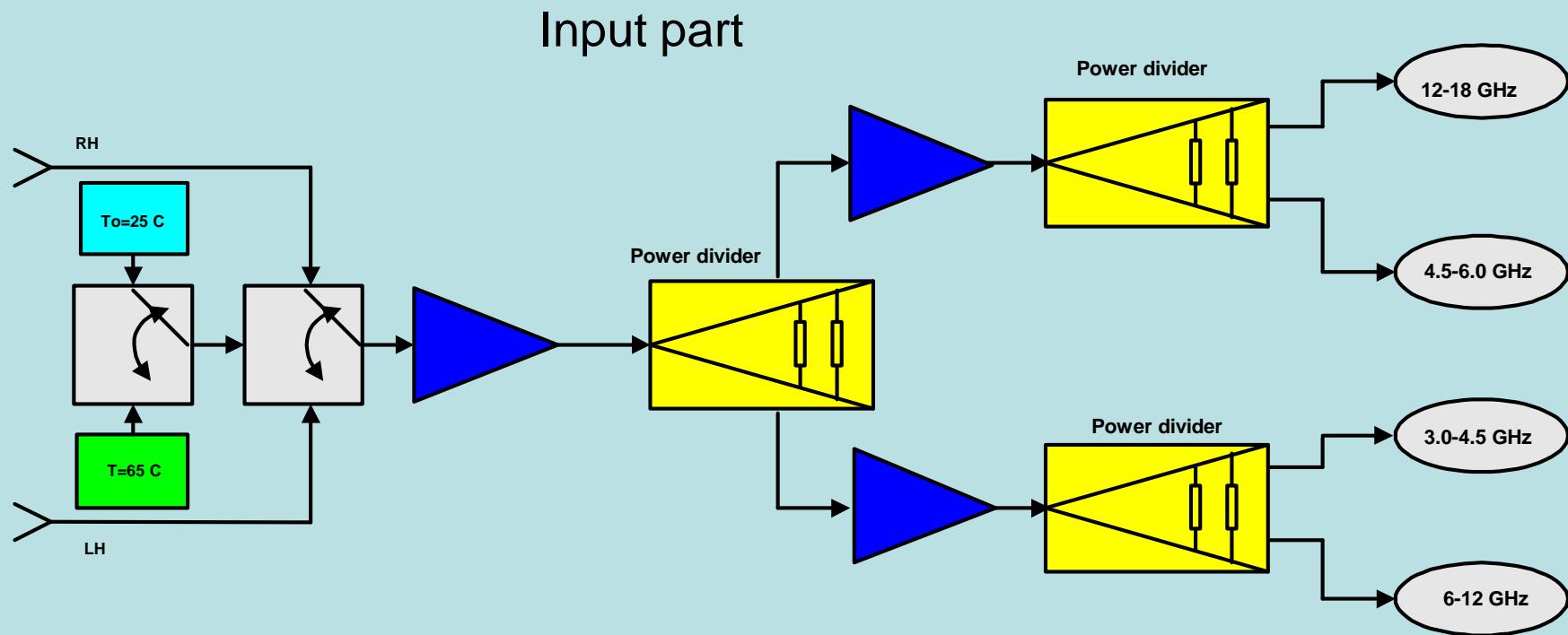
- Другие...

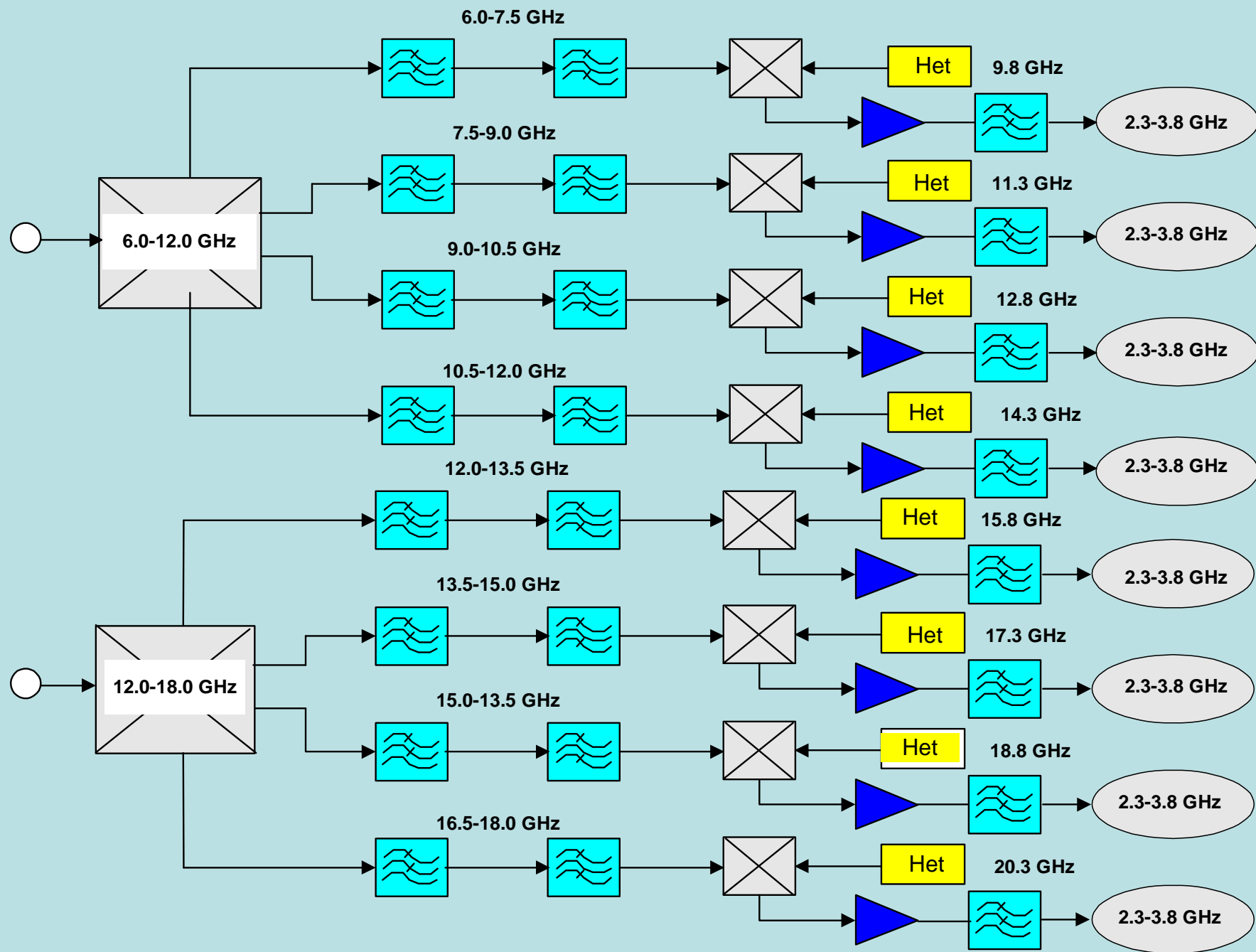
## Облучатели на двухзаходных спиралях для R и L поляризаций



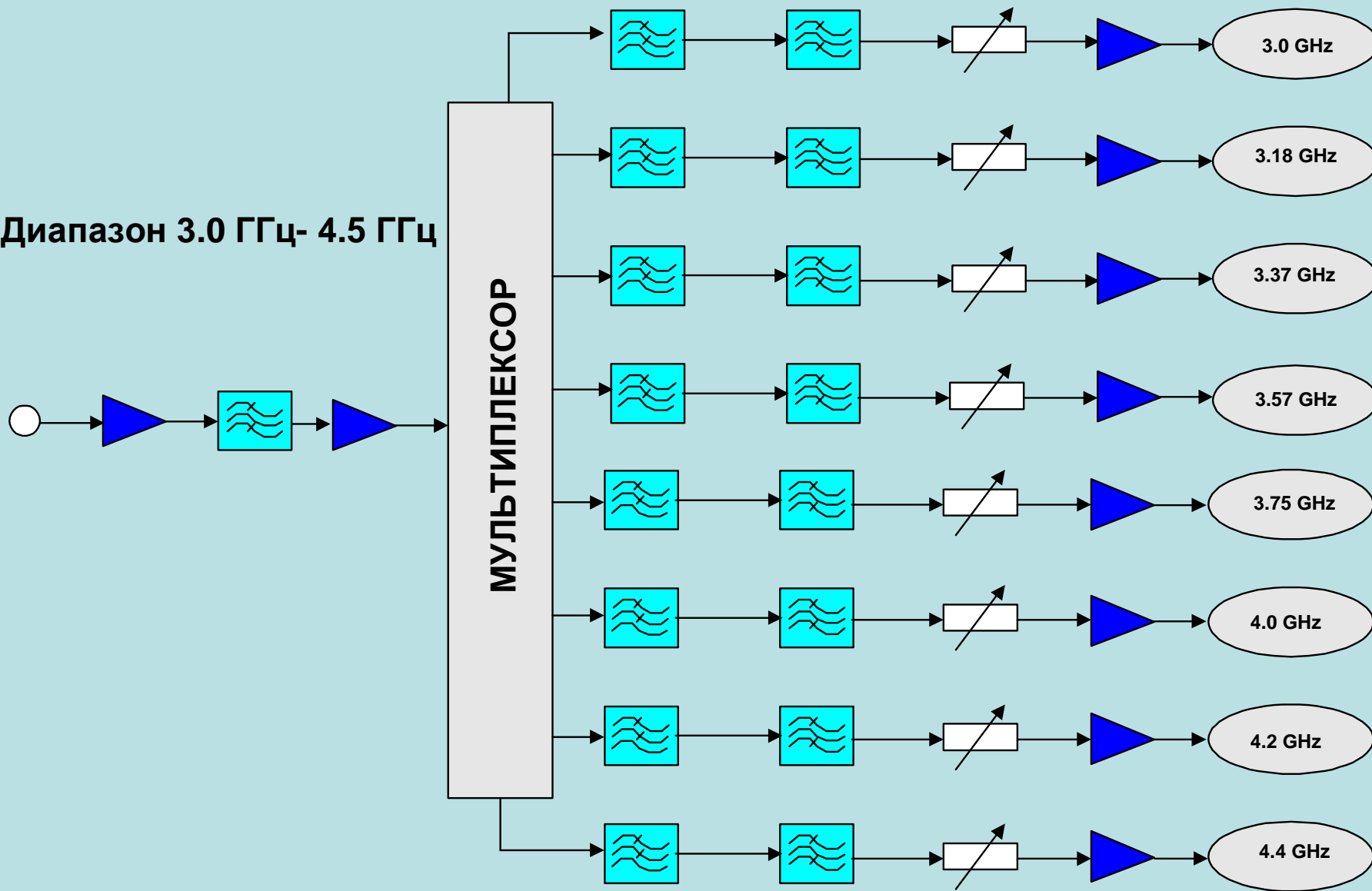
РАТАН-600

# Схема поляризационного спектрографа

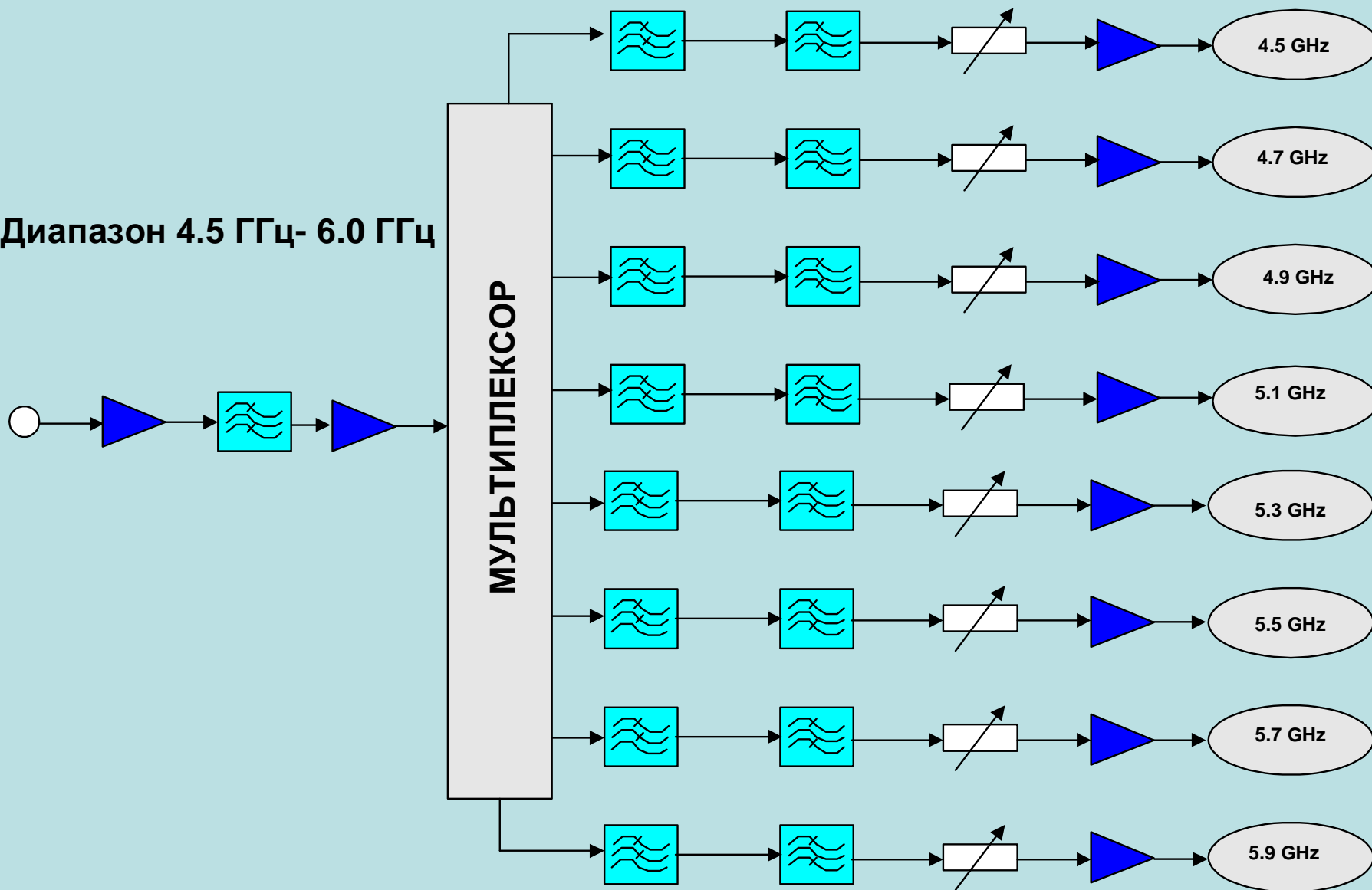




Диапазон 3.0 ГГц- 4.5 ГГц

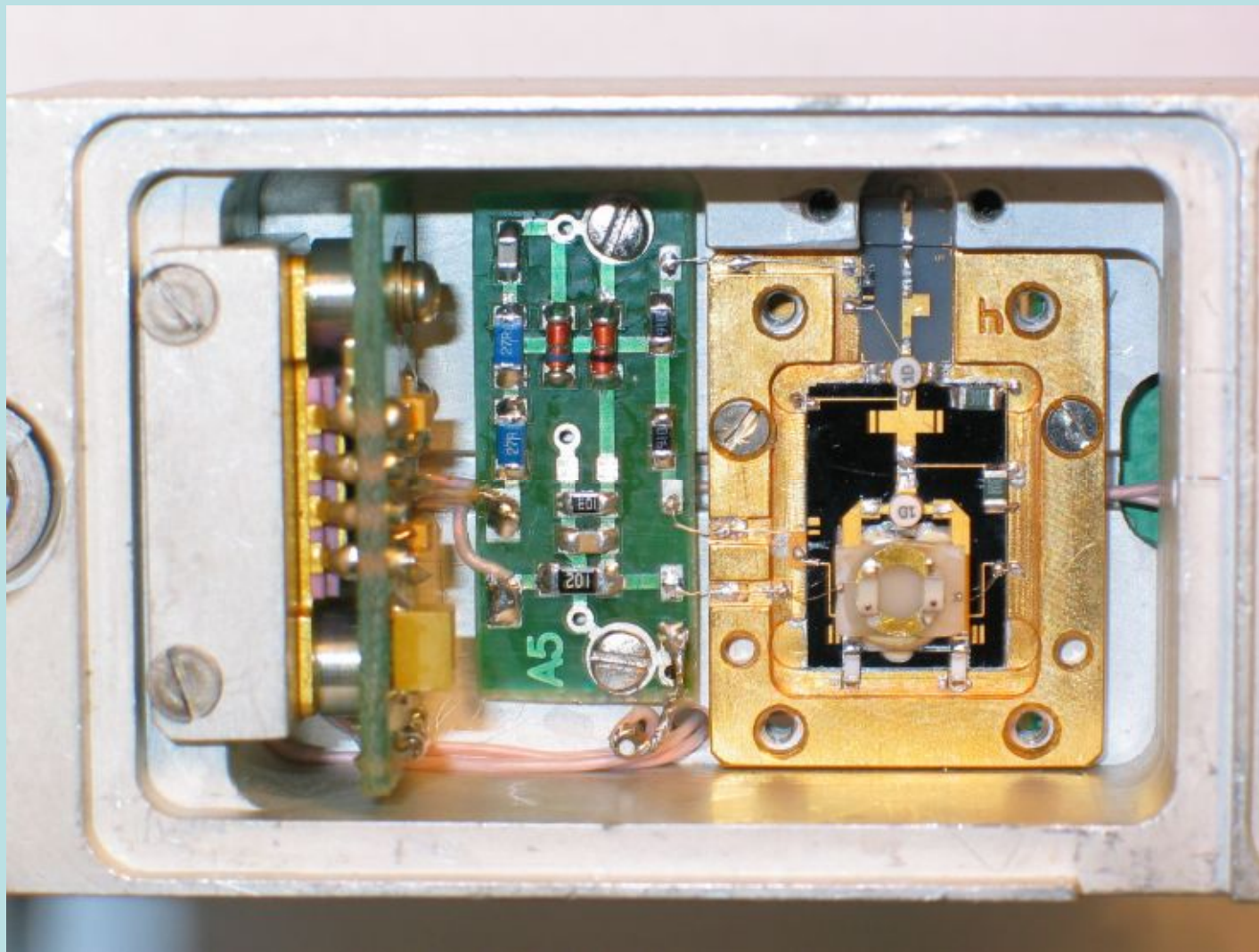


Диапазон 4.5 ГГц- 6.0 ГГц





# Элементы СВЧ-блока



CH3 S21

dB MAG 10 dB/

REF 0 dB

1: 15.21 dB  
14.38975 GHz

SCALE

ADD CONSTANT  
-10 dB

AUTOSCALE

SCALE/DIV

REFERENCE VALUE

REFERENCE POSITION

CAL  
ADD  
OFS

MAX VALUE

CPL

MIN VALUE

FIL  
1K

ADD  
CONSTANT

ZOOM

-10 dB/

-50 dB

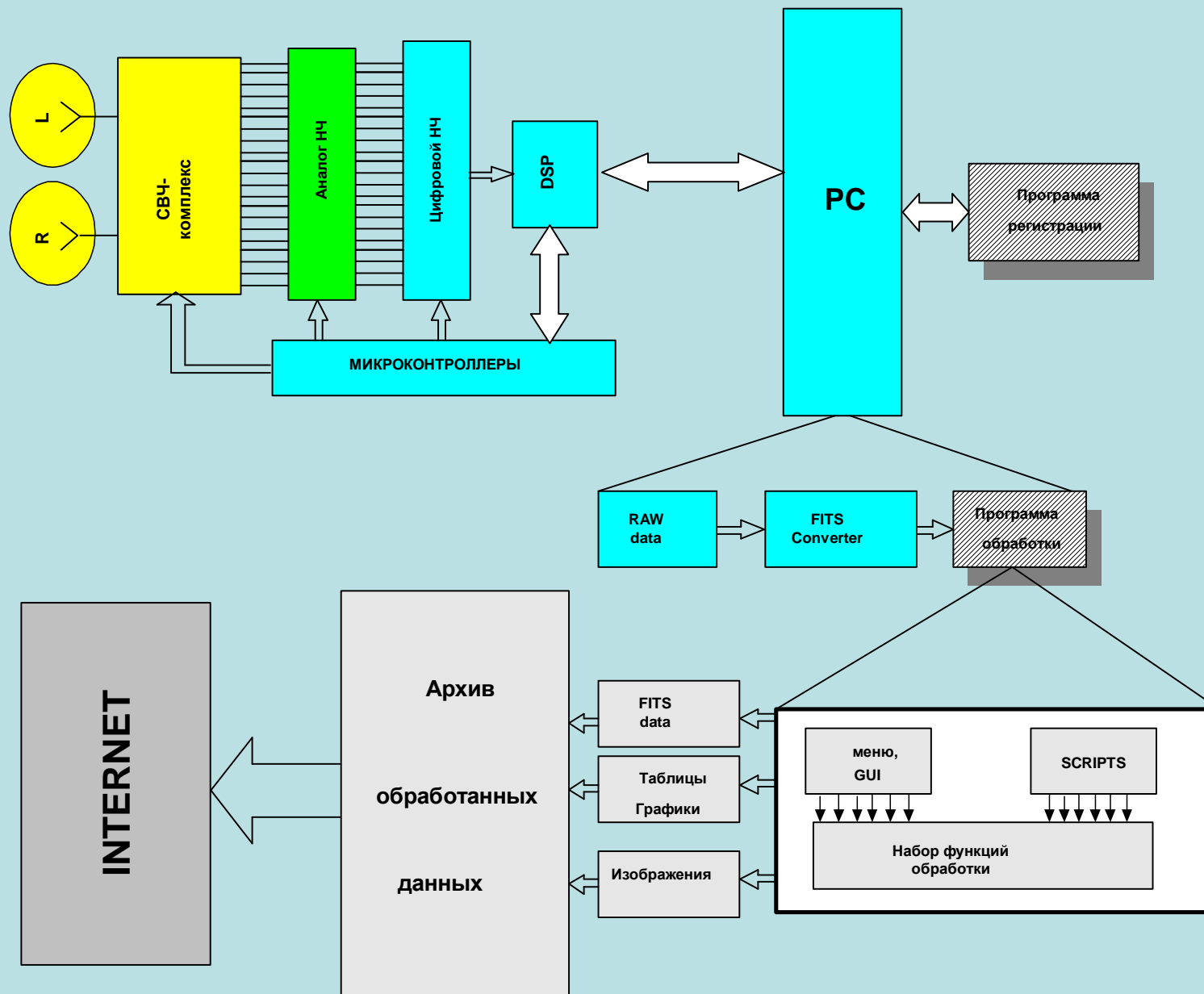
START 100 MHz

2 GHz/

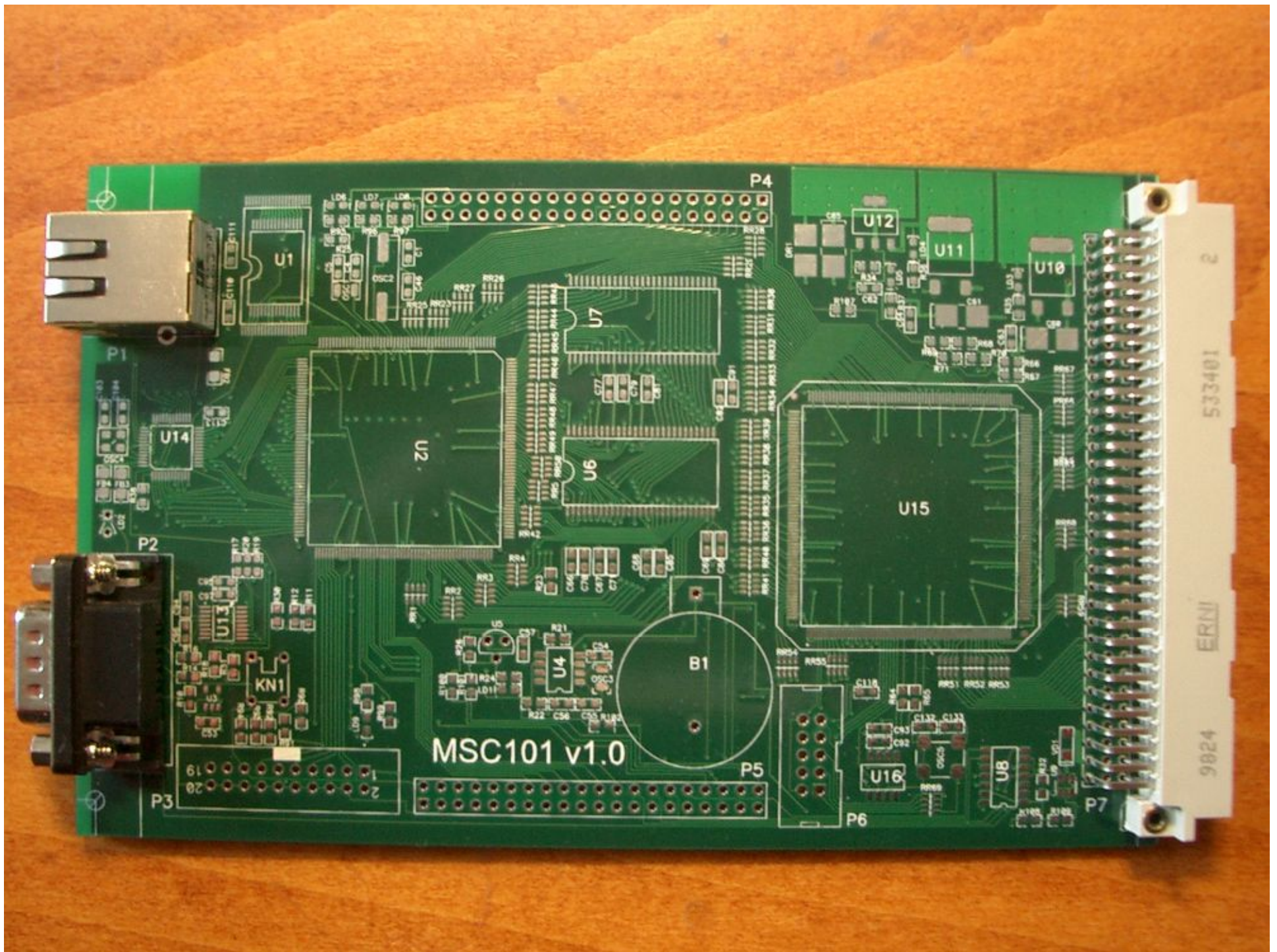
STOP 22 GHz



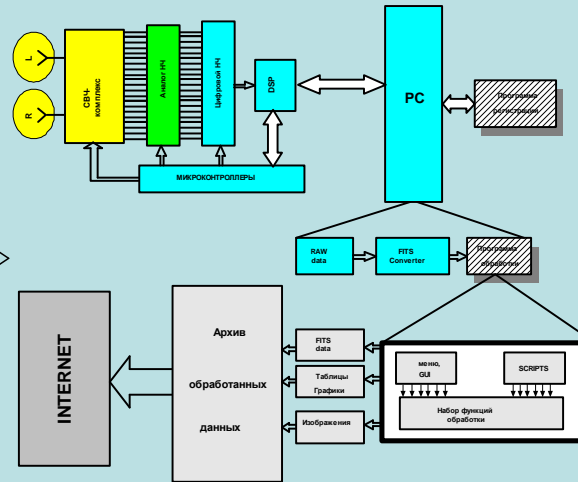
# Функциональная схема СПКВР-1



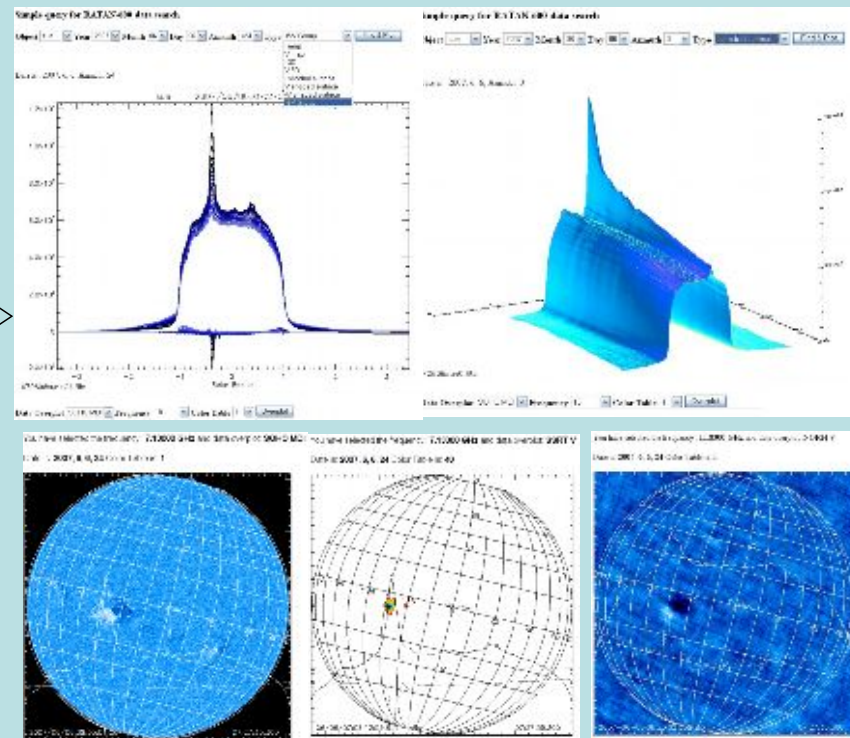




**СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ**  
**СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ**  
БАЛДИН С.В. Г АРАИМОВ В.И.

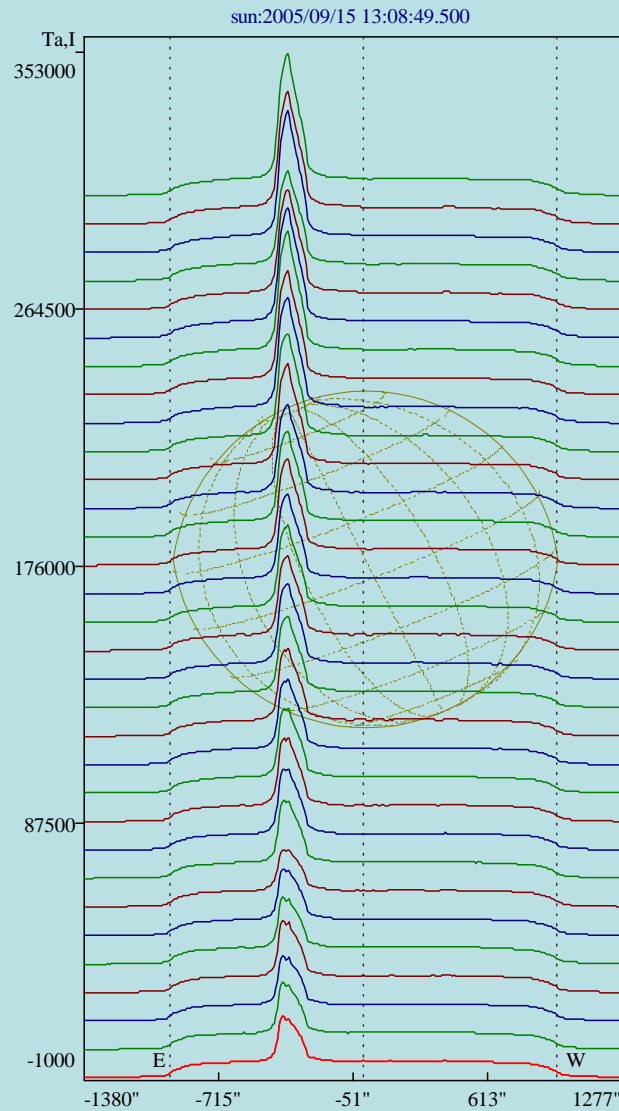


**СЕРВЕР ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ**  
ТОХЧУКОВА С.Х.

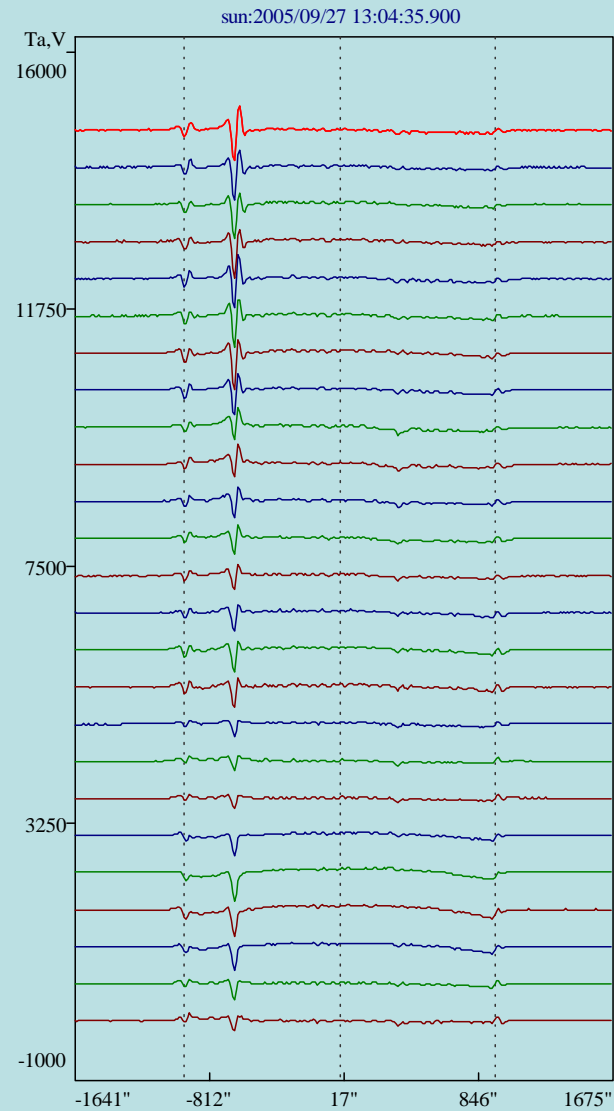




# Пример наблюдений на СПКВР-1

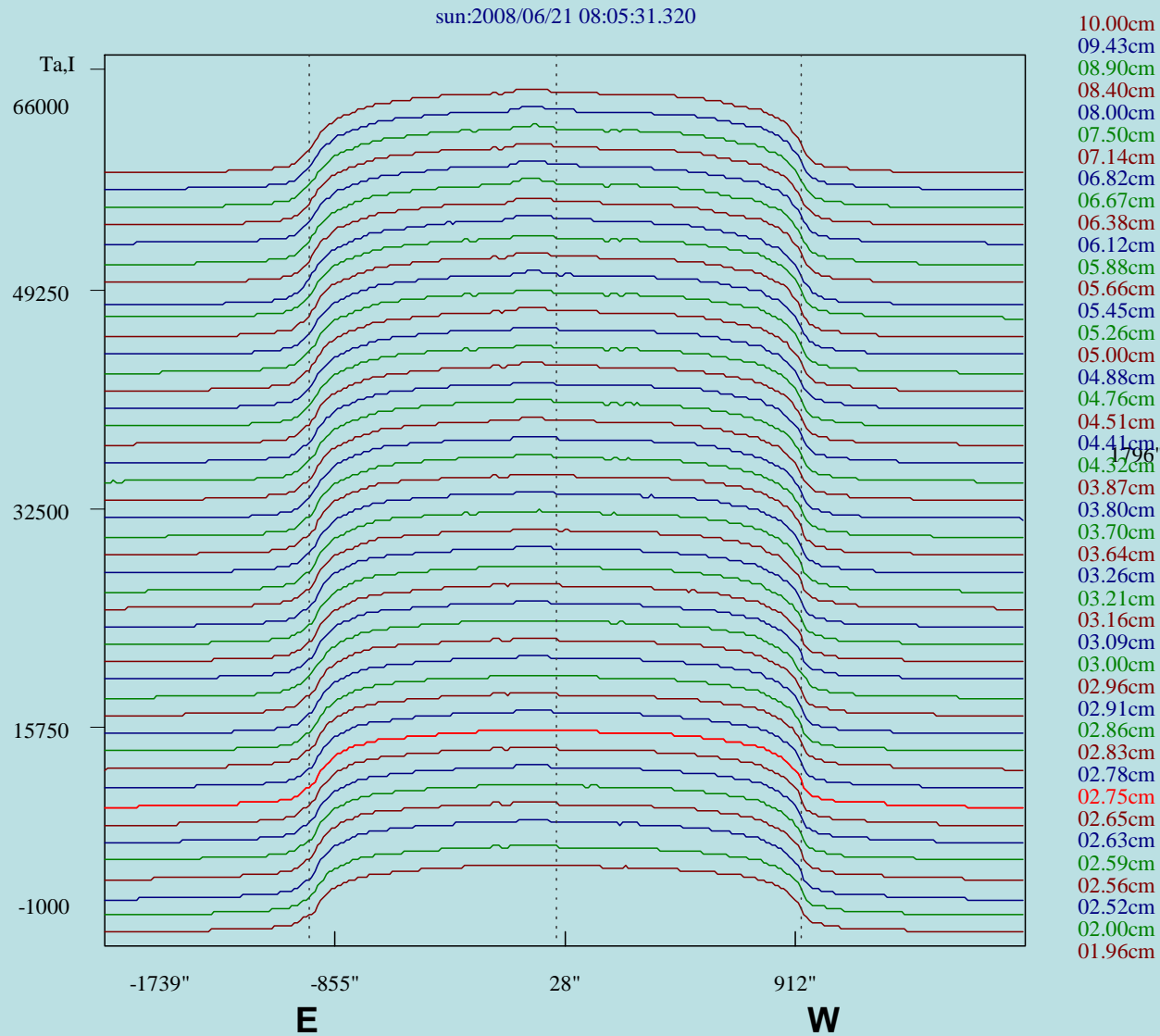


02.96cm  
02.90cm  
02.87cm  
02.81cm  
02.76cm  
02.72cm  
02.67cm  
02.63cm  
02.58cm  
02.54cm  
02.51cm  
02.47cm  
02.43cm  
02.39cm  
02.32cm  
02.28cm  
02.26cm  
02.23cm  
02.20cm  
02.16cm  
02.13cm  
02.11cm  
02.08cm  
02.05cm  
02.02cm  
02.00cm  
01.98cm  
01.93cm  
01.91cm  
01.88cm  
01.86cm  
01.84cm



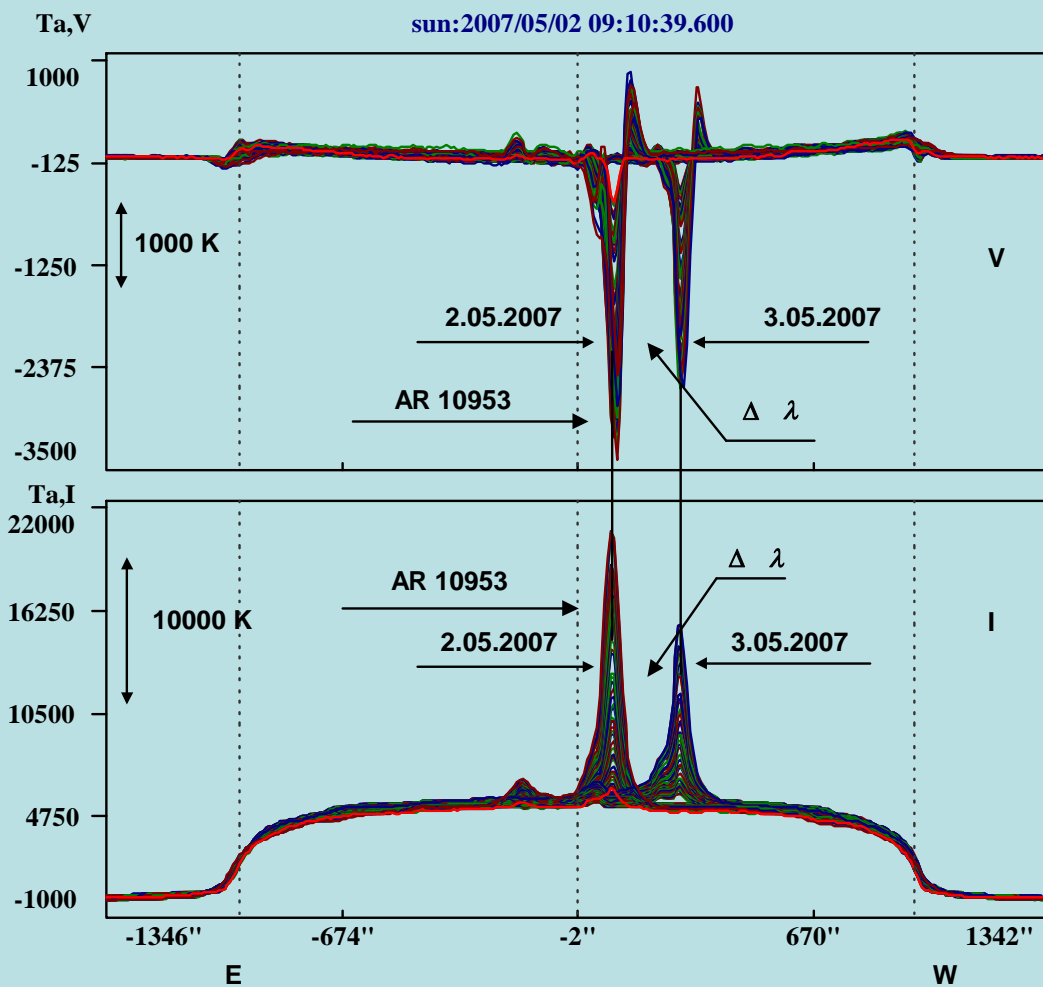
05.02cm  
04.86cm  
04.73cm  
04.57cm  
04.45cm  
04.32cm  
04.21cm  
04.10cm  
04.02cm  
03.91cm  
03.81cm  
03.73cm  
03.64cm  
03.55cm  
03.48cm  
03.40cm  
03.35cm  
03.27cm  
03.21cm  
03.14cm  
03.08cm  
03.02cm  
02.96cm  
02.90cm  
02.87cm

# Пример многоволновых наблюдений на новом комплексе СПКВР-2

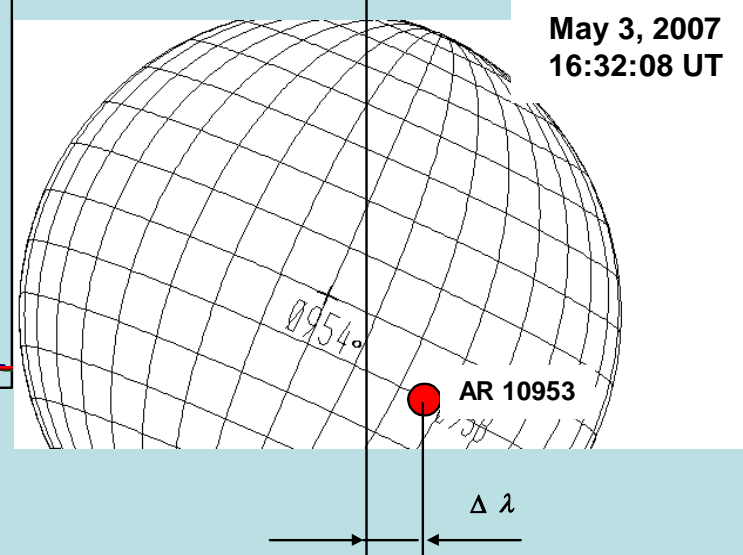
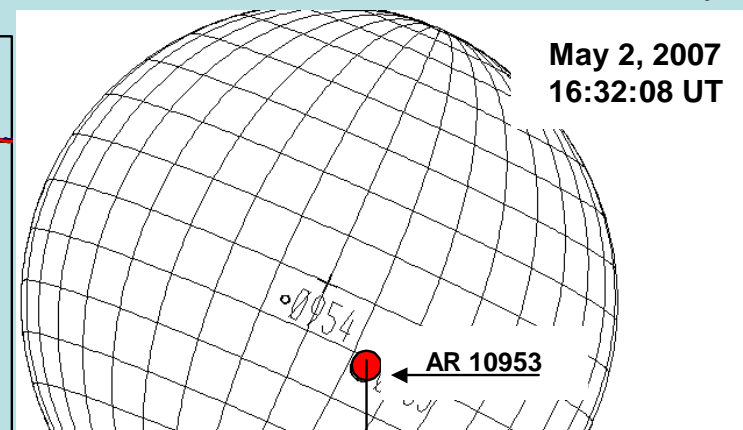




# Сопоставление наблюдений на РАТАН-600 за 2 и 3 мая 2007



Mees observatory



## NOAA 0953 за 03-02.05.2007.

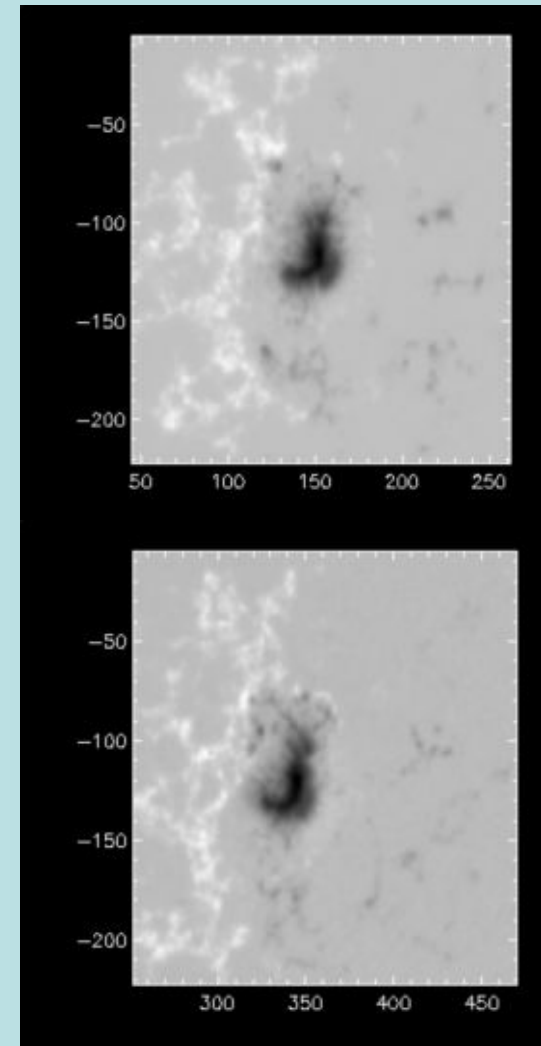
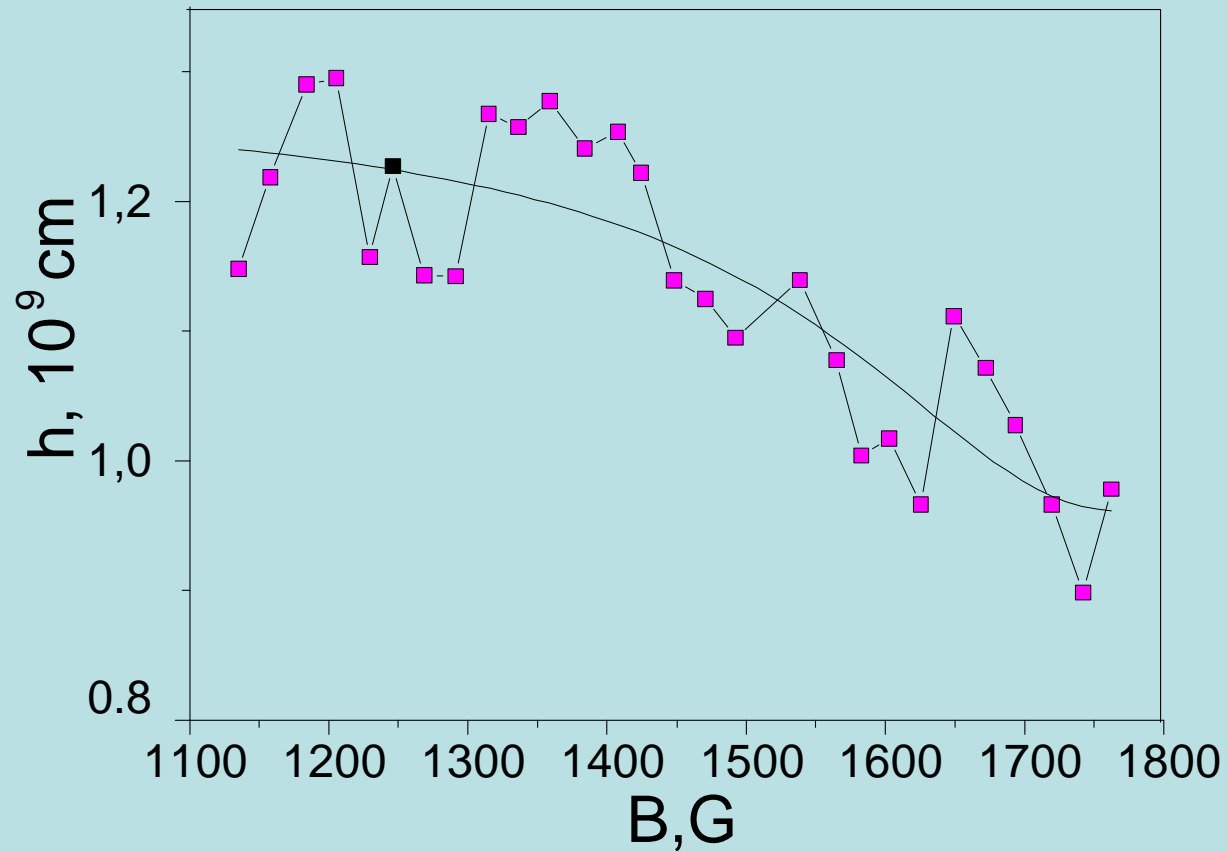


Рис. Высотное распределение магнитного поля от высоты для АО NOAA 0953. Справа, данные MDI SOHO

# NOAA 0953 за 03-02.05.2007.

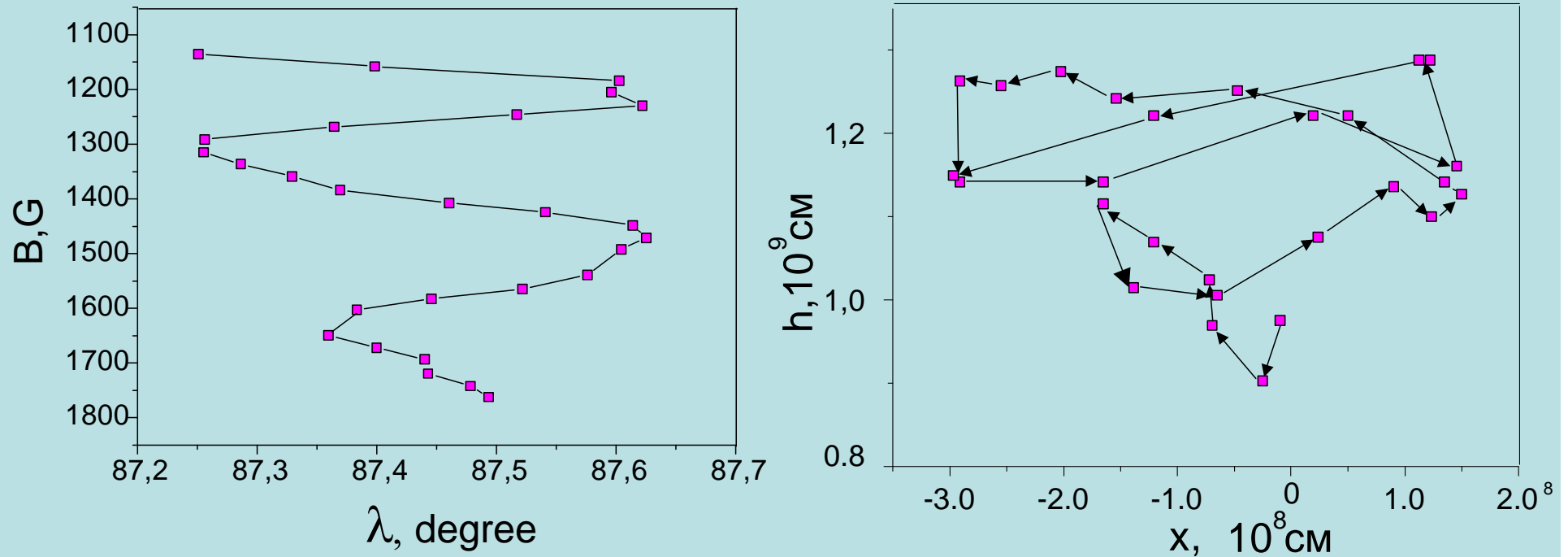
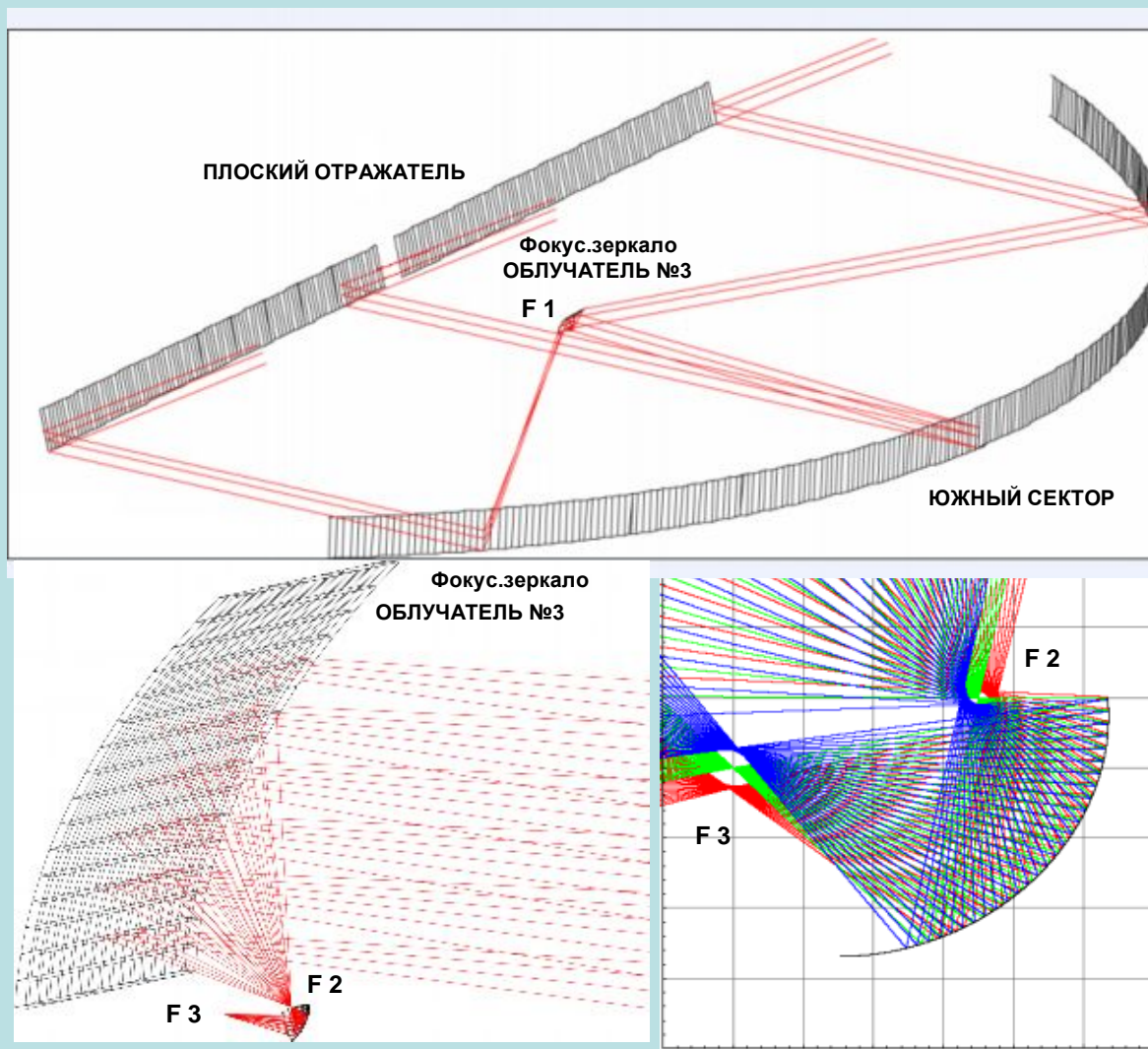


Рис. Структура силовой трубки магнитного поля для АО NOAA 0953. Слева - зависимость магнитного поля от долготы ( $\lambda$  монотонная). Справа – зависимость высоты  $h$  от масштаба на фотосфере  $x$ . Из сопоставлений рисунков видно, что силовая трубка распространяется вверх по спирали, шириной около 0.4 градус

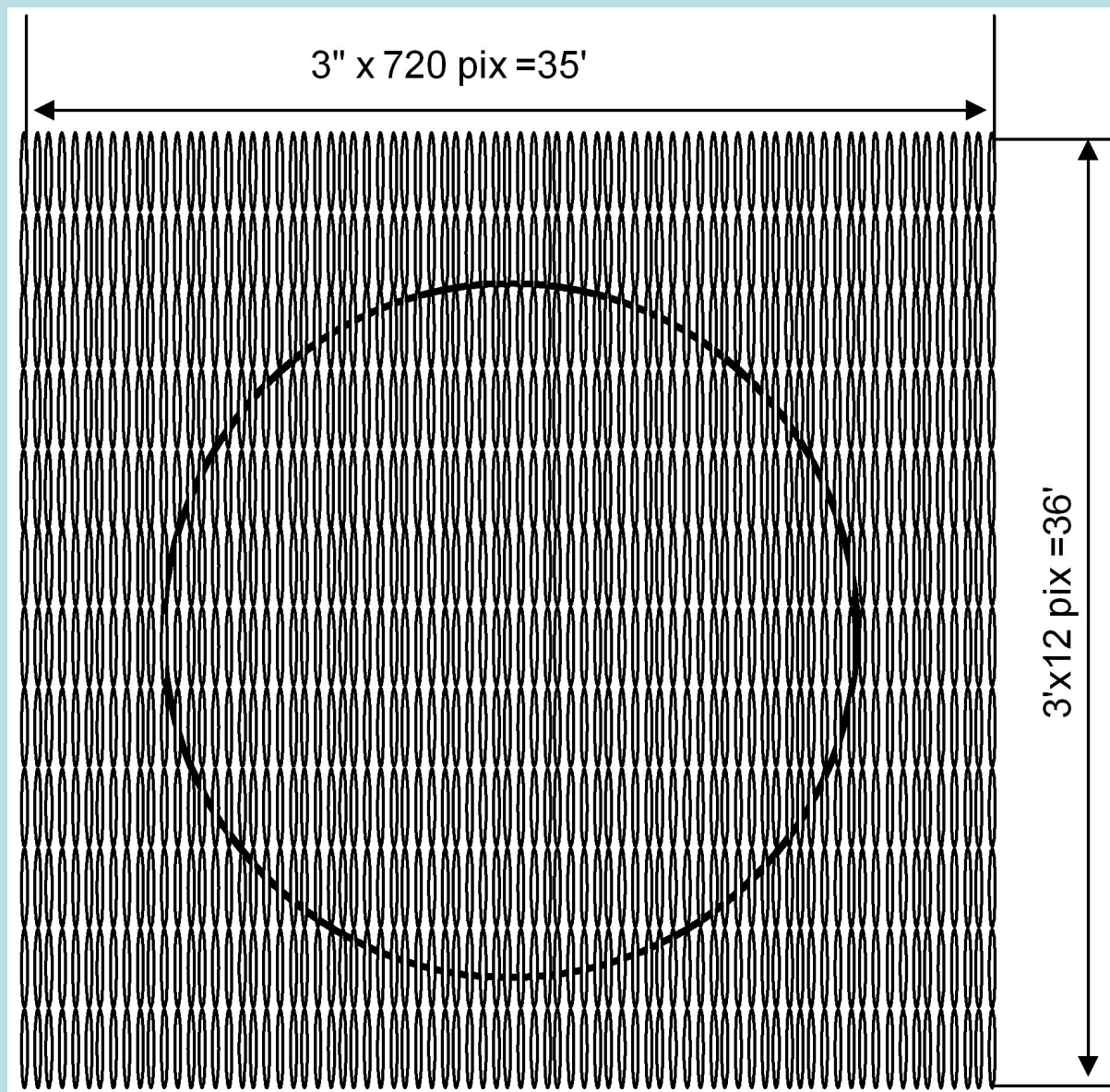
# Моделирование режима Юг+Плоский РАТАН-600 с корректирующим зеркалом



## Цель

- Улучшение поляризационных характеристик в системе Юг+Перископ
- Расширение безабберационного поля зрения
- Освоение высокочастотного диапазона 8мм-4 мм

[Лебедев и др., 2008]



**Матрица лучей  
радиотелескопа  
в поле зрения  
40'x40'**

- Рис. Расчетная многопиксельная диаграмма с матрицей в фокальной плоскости на волне 3 мм в системе Юг+Перископ

# Анонс сопутствующих сообщений

**В разработке  
находятся**

**Характеристики**

**СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ**  
для 112- частотных каналов  
**СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ**  
**БАЛДИН С.В. Г АРАИМОВ В.И.**

1. Полная автоматизация процесса наблюдений
2. Параллельный анализ спектра
3. Высокое быстродействие
4. Высокий динамический диапазон

**СЕРВЕР ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ**  
**ТОХЧУКОВА С.Х.**

*Развитие методики прогнозирования активности на основе одновременных спектральных наблюдений в 8-октавном радиоволн*

*Моделирование режима работы антенной системы "Юг+Плоский" РАТАН-600 с корректирующим зеркалом*  
**М. ЛЕБЕДЕВ, В.Б.ХАЙКИН, В.М.БОГОД**

1. Улучшение поляризационных характеристик в системе Юг+Пл
2. Расширение поля зрения инструмента
3. Освоение высокочастотного диапазона 8 мм-4 мм

# НАШИ ПЕРСПЕКТИВЫ

1. Завершение перекрытия паспортного диапазона радиотелескопа с 1-3% частотным разрешением и параллельным анализом спектра интенсивности и круговой поляризации
2. Развитие методов двумерного картографирования
3. Развитие методов длительных азимутальных наблюдений
4. Расширение рабочего диапазона в сторону коротких волн до 3-4 мм,
5. Расширение рабочего диапазона в сторону длинных волн до 50-60 см



**БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!**



- Начало наблюдений Солнца
- Солнце- лаборатория
- Солнце –яркое
- Поэтому р-т маленькие
- Источник на диске
- Солнце ограничивает чувствительность
- Полоса и время
- Путь- площадь
- Но дорого
- Поэтому возникли радиогелиографы с мгновенными изображениями и простр разрешением
- Но их мало. Это NoRH, SSRT, Nance, (VLA OVRO GMRT)
- Новые в США и Китае
- Но радиогелиографы и + и –
- **РАТАН- уникален, 3 цикла, обнаружено много новых явлений**
- **В солн. Р-а нужен новый инструмент**
- **Далее о месте Р-600 среди других телескопов**