

# Лабораторная работа: спектральные наблюдения в линиях водяного пара (22 ГГц) космических мазерных источников. На примерах наблюдений и обработки данных космических мазеров H<sub>2</sub>O на РТ-22 ПРАО АКЦ ФИАН.

Самодуров В.А.

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН.

## Аннотация

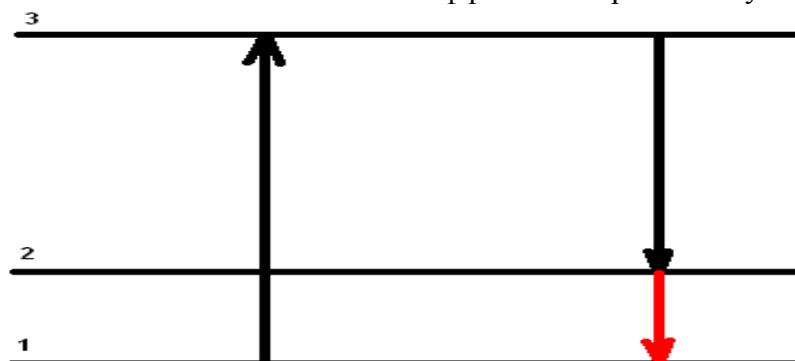
В данной лабораторной работе приводятся наблюдения и результаты регулярных спектральных наблюдений для избранных мазерных источников в областях звездообразования и AGB-звезд нашей Галактики в линии водяного пара на 22 ГГц при помощи радиотелескопа РТ-22 (ПРАО АКЦ ФИАН). Начиная с 1979 г. на радиотелескопе РТ-22 (г.Пушино) объединенной группой ГАИШ (Лехт Е.Е., Рудницкий Г.М., Пащенко М.И. и др.) и ПРАО АКЦ ФИАН (Берулис Й.Й., Самодуров В.А., Толмачев А.М., Субаев И.А. и др.) проводятся регулярные (раз в 1-3 месяца) спектральные наблюдения большой выборки объектов мазерного излучения в линии водяного пара на волне 1.35 см (22 ГГц). В данной методической работе кратко изложены методы наблюдений и обработки данных спектральных наблюдений. Почти все материалы по лабораторной работе можно скачать по ftp-адресу: [ftp://data.prao.ru:8021/Observations/AstroShool/Spectra\\_Lab/](ftp://data.prao.ru:8021/Observations/AstroShool/Spectra_Lab/)

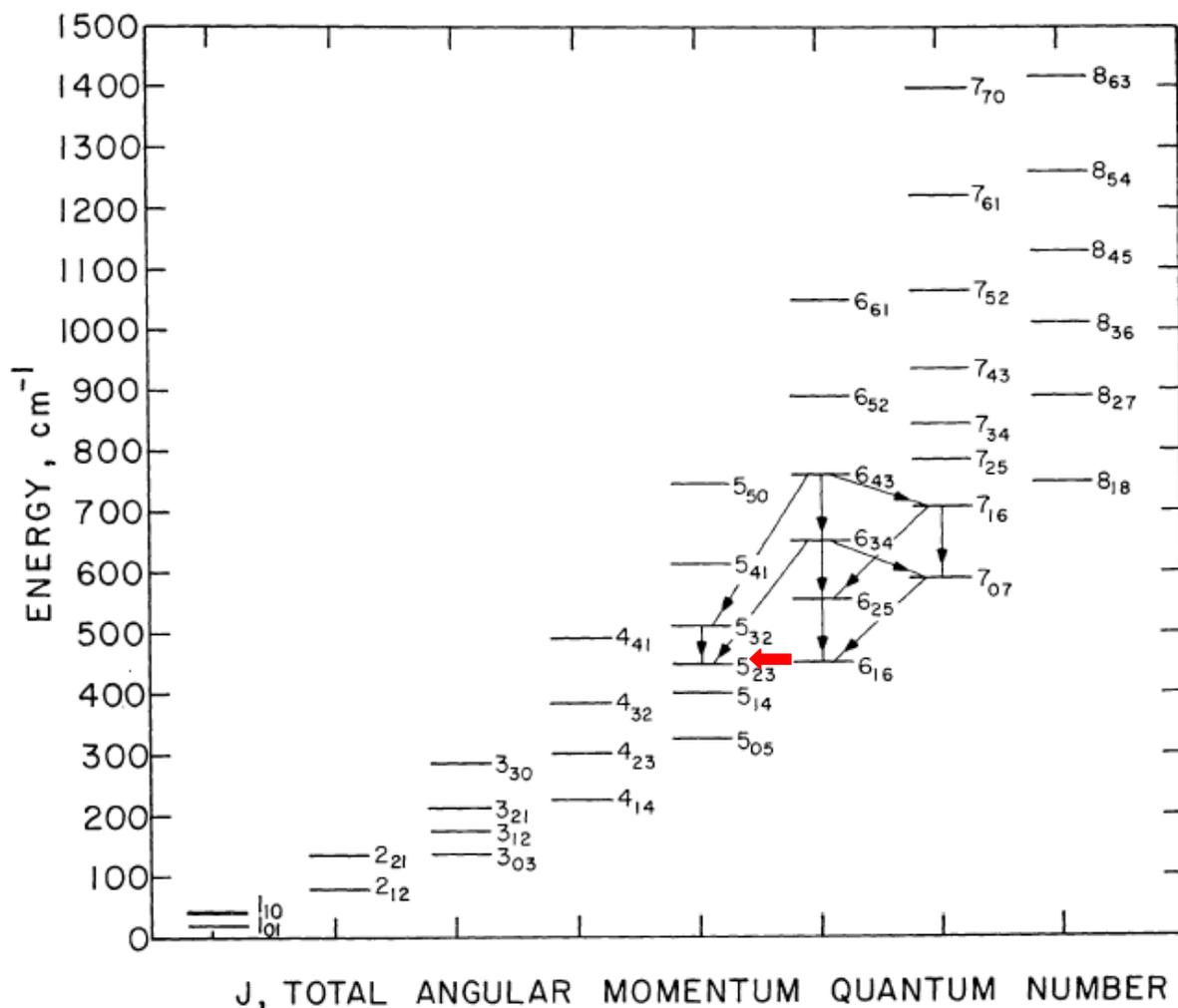
## Часть I: наблюдения на РТ-22 ПРАО ФИАН.

### Введение, немного теории: что такое мазерные источники?

В плотных молекулярных облаках межзвёздной среды идёт процесс возникновения новых звёзд. При этом некоторые молекулы переходят в особый режим усиления радиоволн (мазерный эффект). Существование мазерного эффекта в космосе свидетельствует о длительном поддержании в естественных условиях сильно неравновесной заселённости энергетических уровней атомов и молекул. Это возможно лишь в условиях постоянно действующей накачки, энергии, поддерживающей инверсию населённостей сигнальных уровней (который и вызывает лавинообразный переход между уровнями 1,2 на рис. 1). Цикл накачки включает несколько последовательных переходов: собственно накачки (в простейшем случае переход между уровнями 1 и 3) и стока энергии (переход между уровнями 2 и 3).

Рис. 1: простейшая схема возникновения эффекта мазерного излучения.



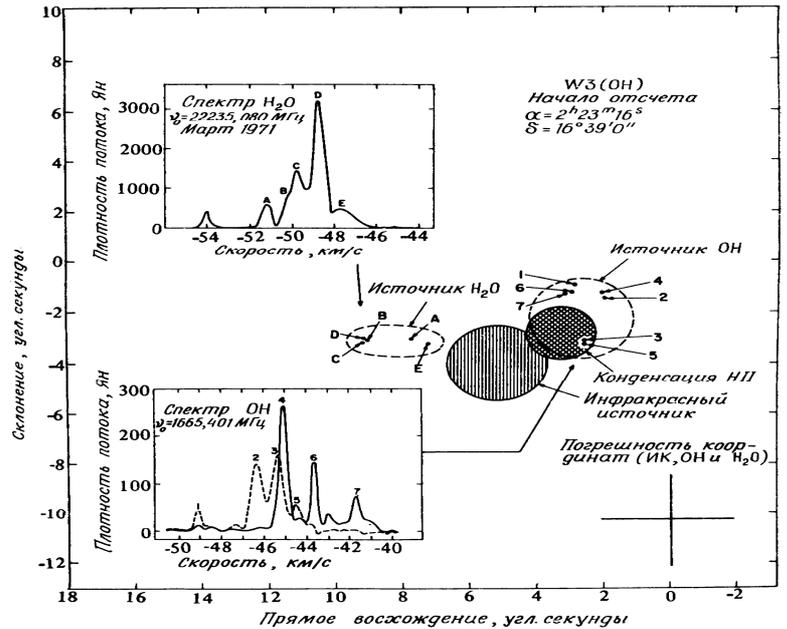


**Рис. 2:** схема возникновения эффекта мазерного излучения в молекуле воды (показаны многочисленные уровни, порождаемые линиями от переходов во вращательных уровнях молекулы) .

Первые мазеры во вращательной линии  $\text{H}_2\text{O}$   $6_{16}-5_{23}$  на волне 1.35 см ( $\nu = 22235.08$  МГц, рис. 2) были открыты в 1968 г. в направлении известных источников мазерного радиоизлучения OH в областях звездообразования. Но, в отличие от молекулы OH, где мазерный эффект имеет место в основном вращательном состоянии, в молекуле  $\text{H}_2\text{O}$  мазерные уровни расположены высоко над основным состоянием, энергия возбуждения соответствует температуре 644 К. Поэтому мазер  $\text{H}_2\text{O}$  – гораздо более энергоёмкое явление, чем мазер OH. И потому космические мазеры в линии воды – самые яркие из всех видов космических мазеров. При этом они – самые динамичные, изменения в спектрах зачастую происходят на отрезках дней и иногда даже часов!

**Характеристики наблюдаемых космических мазеров, таблица 1:**

$\lambda$ , см	$\nu$ , МГц	$\lambda$ , см	$\nu$ , МГц
H <sub>2</sub> O		SiO	
1,348	22235,080	0,	43122,03
OH		0,	42820,48
18,595	1612,231	0,	86243,27
18,001	1665,402	0,	129363,12
17,980	1667,359	CH <sub>3</sub> OH	
17,424	1720,530	1,202	24933,468
4,971	6030,747	1,201	24959,080
4,967	6035,092	1,198	25018,123
6,433	4660,242	1,193	25124,873
6,291	4765,562	1,185	25294,411
2,230	13441,371		

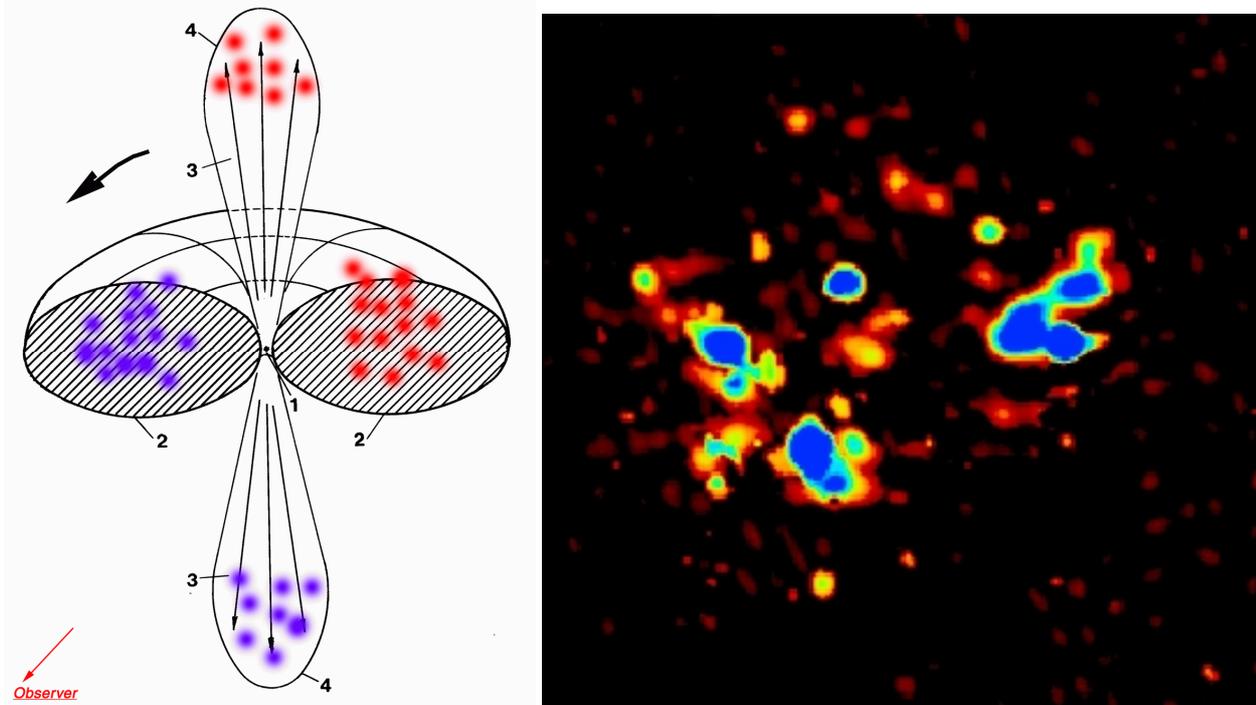


**Рис. 3.** Мазерные источники в области W3

Интересно, что многие космические мазеры испускают радиоизлучение для разных молекул и для разных длин волн. Довольно часто они отражают собой либо разные слои одной области, либо разные эволюционные стадии развития космического источника мазерного излучения.

**Рис. 4.** Наиболее частые объекты для изучения и наблюдений:

- А) мазерные объекты в областях звездообразования (слева).
- Б) мазерные объекты в оболочках звезд поздних спектральных классов (справа).



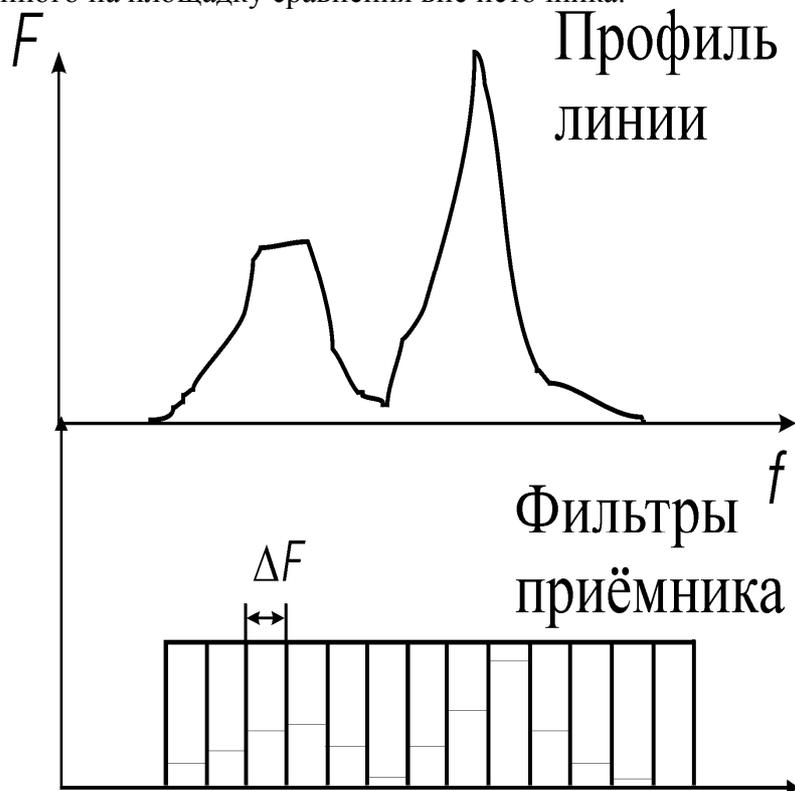
Источниками излучения являются отдельные пятна (конденсации) размером  $\sim 10^{14}$  см, которые собраны в "гнезда" размером  $\sim 10^{16-17}$  см. Число конденсаций в гнезде 10-100, число гнезд в космических мазерах может варьироваться от одного до нескольких десятков. По частоте излучения отд. конденсации можно определить её лучевую скорость с

точностью порядка 0,1 км/с. Разброс лучевых скоростей конденсаций составляет до 100 - 300 км/с. Яркостная температура излучения в линии достигает  $10^{15}$  К для  $H_2O$ ,  $10^{12}$  К для  $OH$ ,  $10^{10}$  К для  $SiO$ . Наблюдения показали, что интенсивность, ширина, профиль спектральной линии конденсации, а также её лучевая скорость переменны в интервалах времени от нескольких минут до >20 лет. Компоненты линий  $OH$ ,  $SiO$  обычно сильно (вплоть до 100%) поляризованы в круговой поляризации; умеренная линейная поляризация (проценты и десятки процентов) наблюдается в линиях  $H_2O$  и  $OH$ .

Несколько более иллюстративно основные сведения о космических мазерах излагаются в прилагающейся к лабораторной работе презентации.

### Спектральные наблюдения на РТ-22 ПРАО ФИАН.

Ширина диаграммы направленности антенны РТ-22 на 22 ГГц составляет 2.6 '. Наблюдения проводятся методом "наведение-наведение" с использованием симметричной диаграммной модуляции. При таком методе антенна наводилась на источник сначала одним рупором, затем другим. Полезный сигнал от источника находился как разность сигналов между сигналом с рупора, направленного на источник, и с рупора, направленного на площадку сравнения вне источника.



**Рис. 5:** спектральные наблюдения профиля мазерной линии космического мазера на приемнике с полосовыми фильтрами.

Подавляющее большинство сеансов 1979-2004 гг. осуществлено 96 — 128 канальными полосовыми фильтрами со спектральным разрешением 7.5 кГц, или 0.101 км/с на один канал. Одна спектрограмма занимает, таким образом 9.7 – 12.94 км/с по лучевым скоростям. Для источников со спектрами, превышающими этот диапазон, снималось несколько экспозиций сигнала вдоль оси лучевых скоростей.

Спектральная шкала по оси частот тождественна оси лучевых скоростей и связана простым соотношением:

$$\Delta F = F_0 \frac{\Delta V_r}{c} \quad (1)$$

- где  $F_0=22235.08$  МГц,  $c=299792.458$  км/с.

Начиная с 2004 г. наблюдения проводятся при помощи автокорреляционного приемника на 2048 каналов в полосе частот 3 ... 50 МГц. Чаще всего используется полоса 12.5 МГц, 2048 каналов (спектральное разрешение 6.104 кГц, или 0.082 км/с на один канал). В указанном режиме весь спектр занимает на оси лучевых скоростей 168.5 км/с, что более чем достаточно практически для всех мазерных источников (лишь W49N и W51M из наблюдаемой нами выборки обладают более широким спектральным диапазоном на оси лучевых скоростей). Поскольку автокорреляционный приемник полностью откалиброван для совпадения старых данных (до 2004 г.) с новыми (за исключением ширины одного спектрального канала), то в сути своей спектральные наблюдения на автокорреляционном приемнике не отличаются от наблюдений на полосовом приемнике (рис. 5).

Первая часть данной лабораторной работы посвящена наблюдениям именно на автокорреляционном приемнике, вторая часть – примерам обработки данных различных мазерных источников – как с полосового приемника, так и с корреляционного.

### Запуск спектральных наблюдений на РТ-22.

Запуск таких наблюдений возможен и в удаленном режиме, вызовом нужного компьютера ПРАО (из Windows XP):

Пуск—Программы—Стандартные—Подключение к удаленному рабочему столу.

### Начальная настройка приемной аппаратуры.

На радиотелескопе РТ-22, последовательно запускаются: компьютер оператора, управляющий наведением радиотелескопа, и затем компьютер наблюдателя. После запуска компьютера наблюдателя осуществляется вход в программу управления автокорреляционным приемником (см. рис. 6).

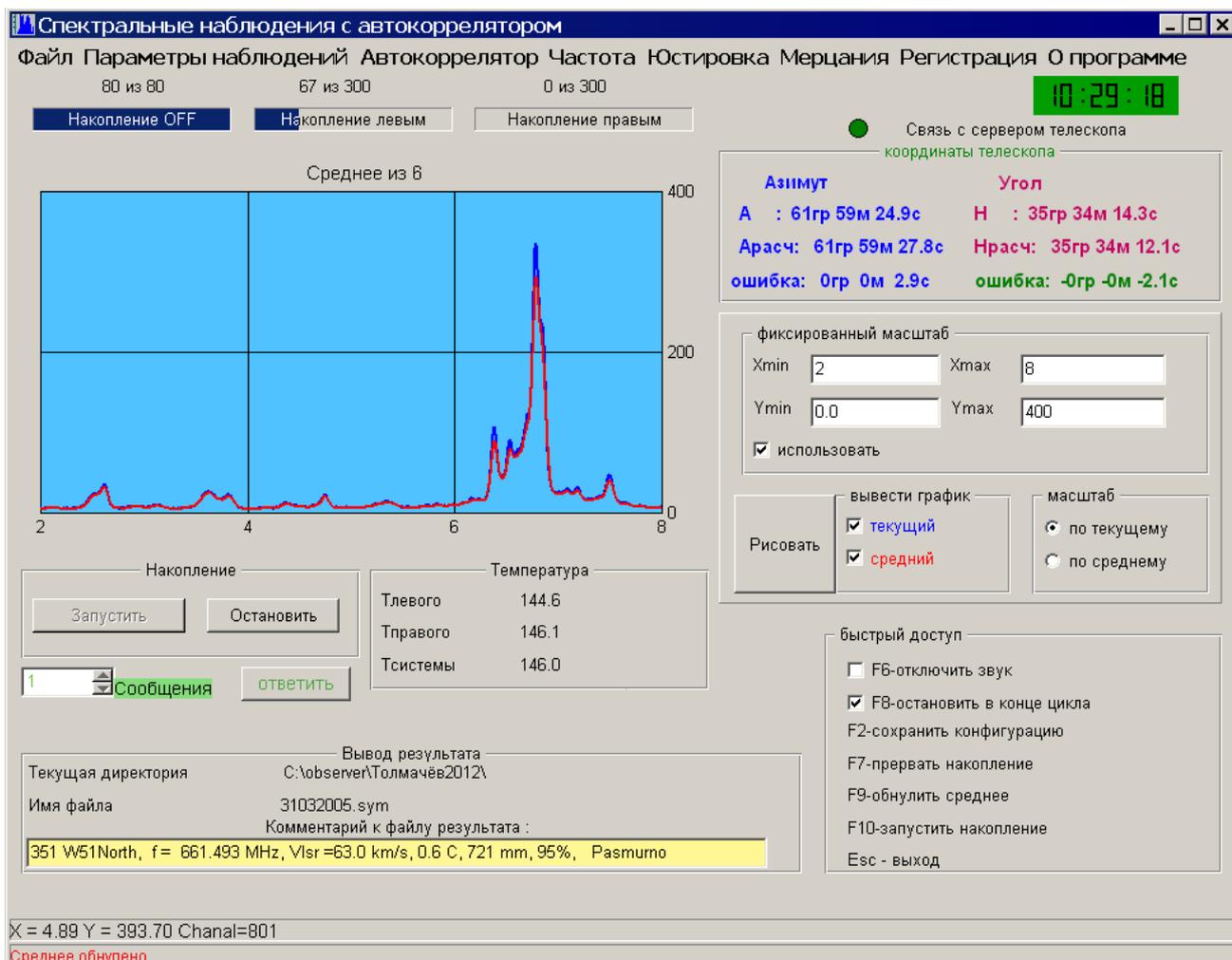


Рис. 6. Вид программы управления автокорреляционным приемником.

Настройки основных параметров наблюдений осуществляются в меню «Параметры наблюдений», рис. 7:

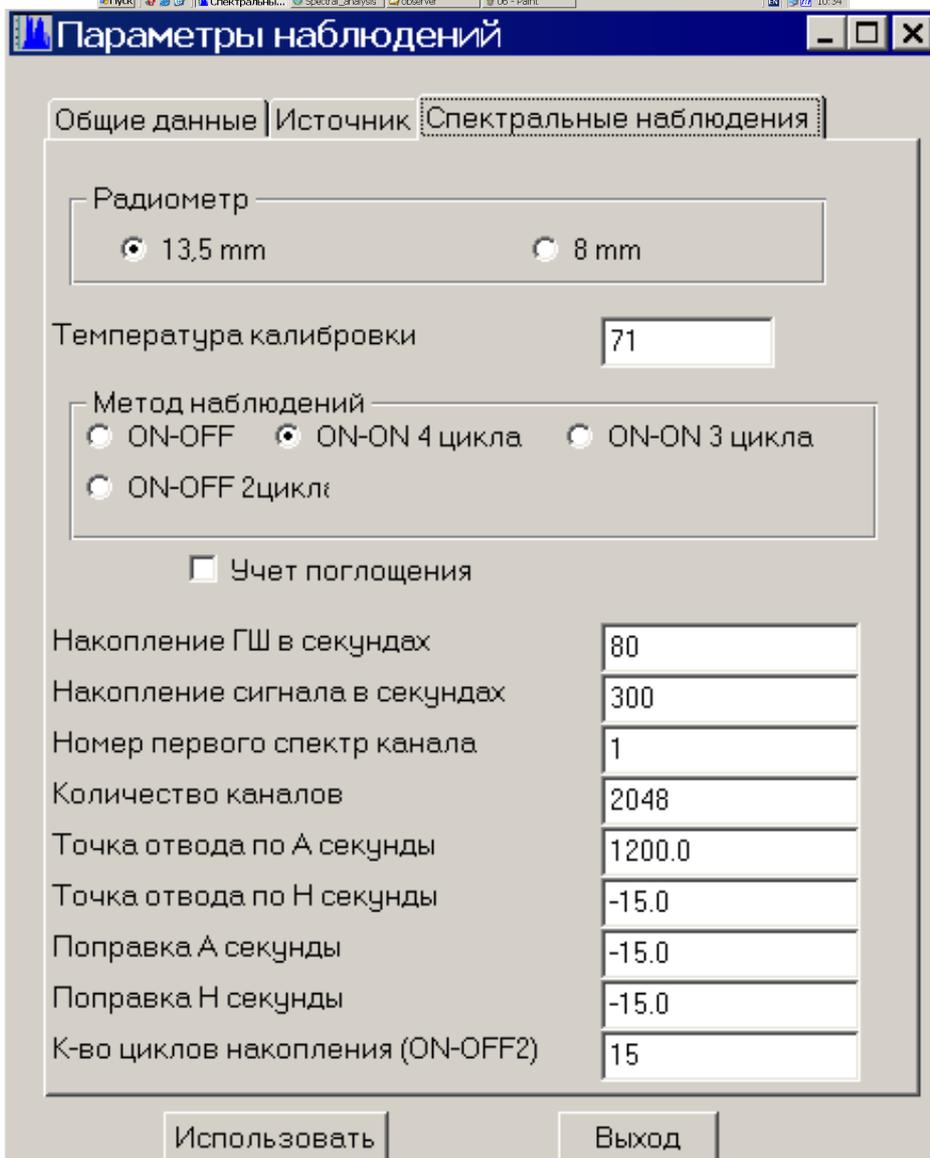
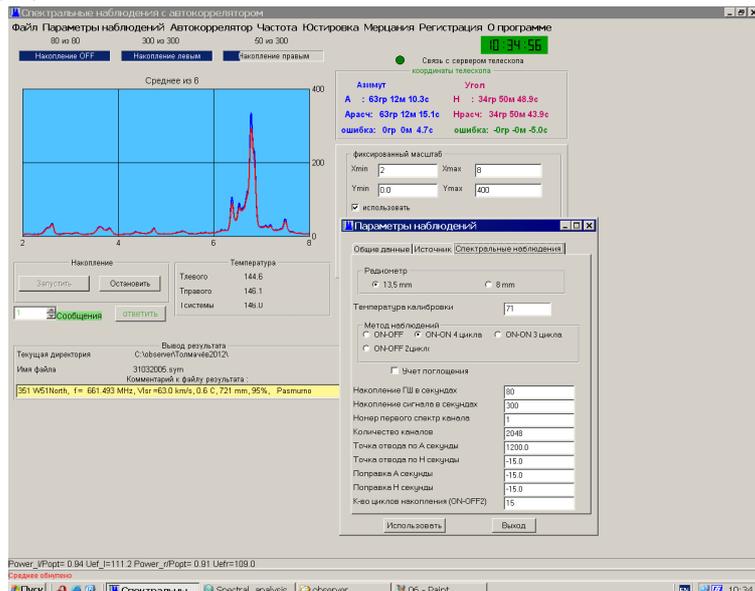


Рис.8. В меню «Параметры наблюдений» настраиваются также параметры спектральных наблюдений (режим наблюдений, экспозиция, число каналов etc).

Параметры наблюдений

Общие данные | Источник | Спектральные наблюдения

Юлианский день 2456017.5  
Звездное время 12 час 35 мин 5.4 сек

Выносы облучателей

Азимут левый сек 440.0  
Азимут правый сек -170.0  
Угол левый сек 790.0  
Угол правый сек 785.0

Метео данные

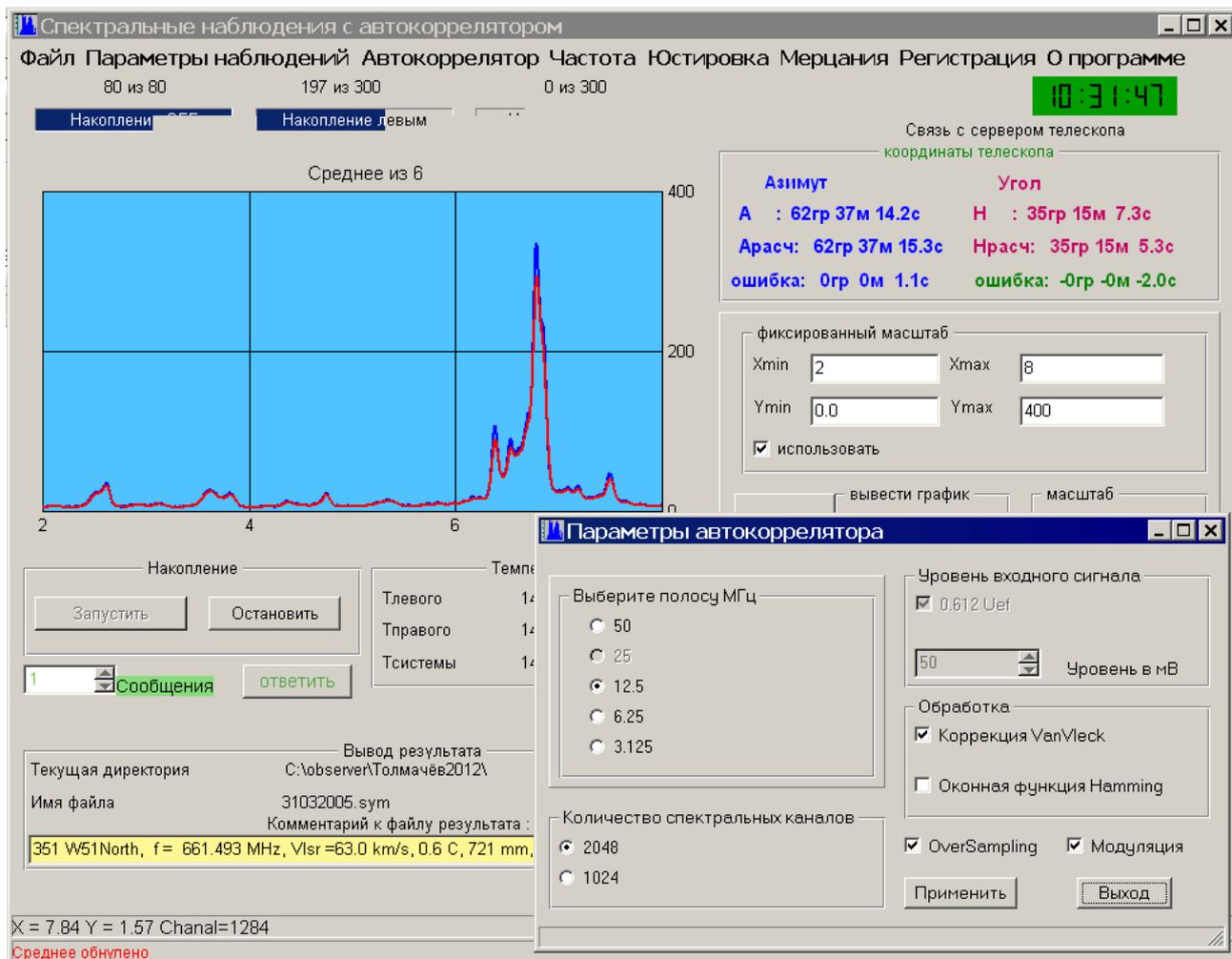
Температура град С 0  
Давление мм рт столба 0  
Влажность % 80

Брать данные с метеостанции

Допустимое рассогласование 40.0

Использовать Выход

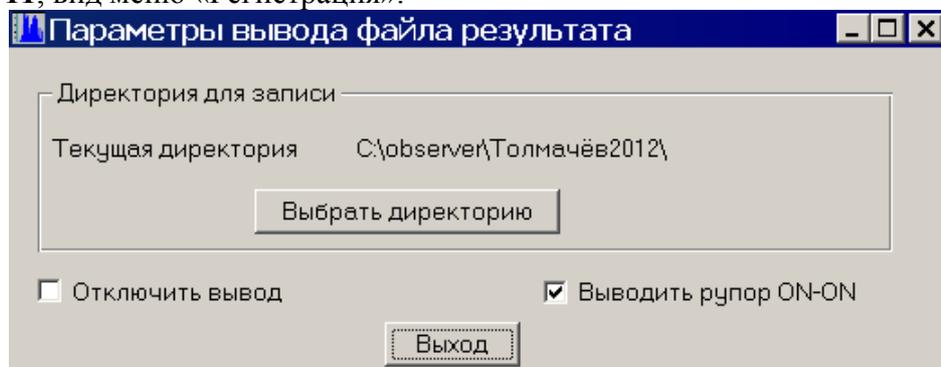
**Рис.9.** Еще в меню «Параметры наблюдений» настраиваются общие данные наблюдений (настройка рупоров приемника и погодные условия).



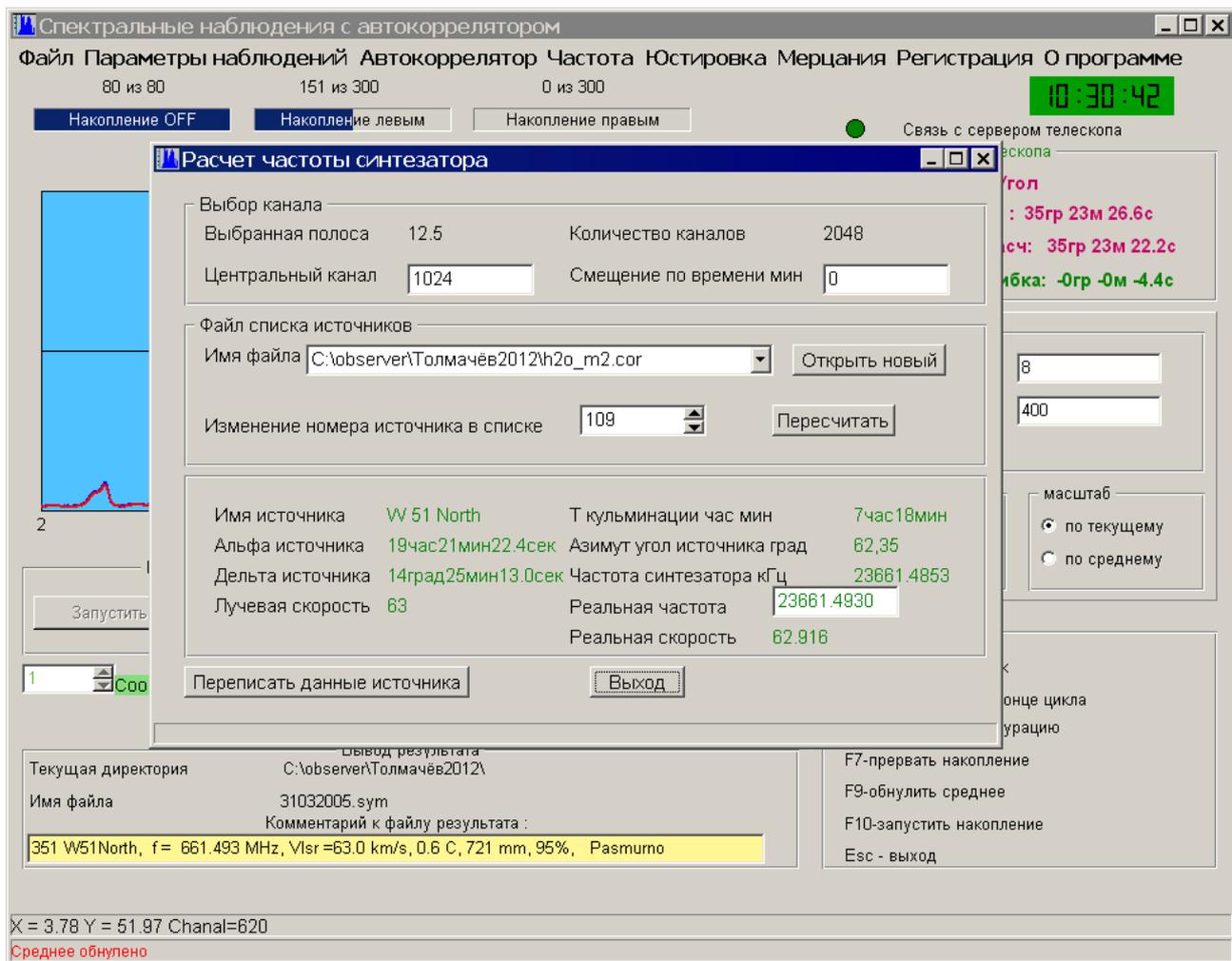
**Рис.10.** Перед началом наблюдений производится настройки параметров автокоррелятора в соответствующем меню. Чаще всего используется полоса 12.5 МГц, 2048 каналов, обязательно должна быть включена коррекция VanVleck (включение поправочной функции для приведение потока к истинной мощности – включать всегда!), OverSampling (способствует уменьшению шумов данных при наблюдениях в полосах, меньших 50 МГц) и, разумеется, Модуляция (сигнал принимается в режиме модуляционного переключения с одного рупора на другой 300 раз в секунду – стандарт наблюдений для РТ-22 ПРАО).

В меню «Регистрация» выбирается директория для записи-регистрации данных и чек-бокс для вывода дополнительного столбца данных ON-ON (позволяет при дальнейшей обработке учесть линейную поляризацию спектров).

**Рис. 11,** вид меню «Регистрация»:



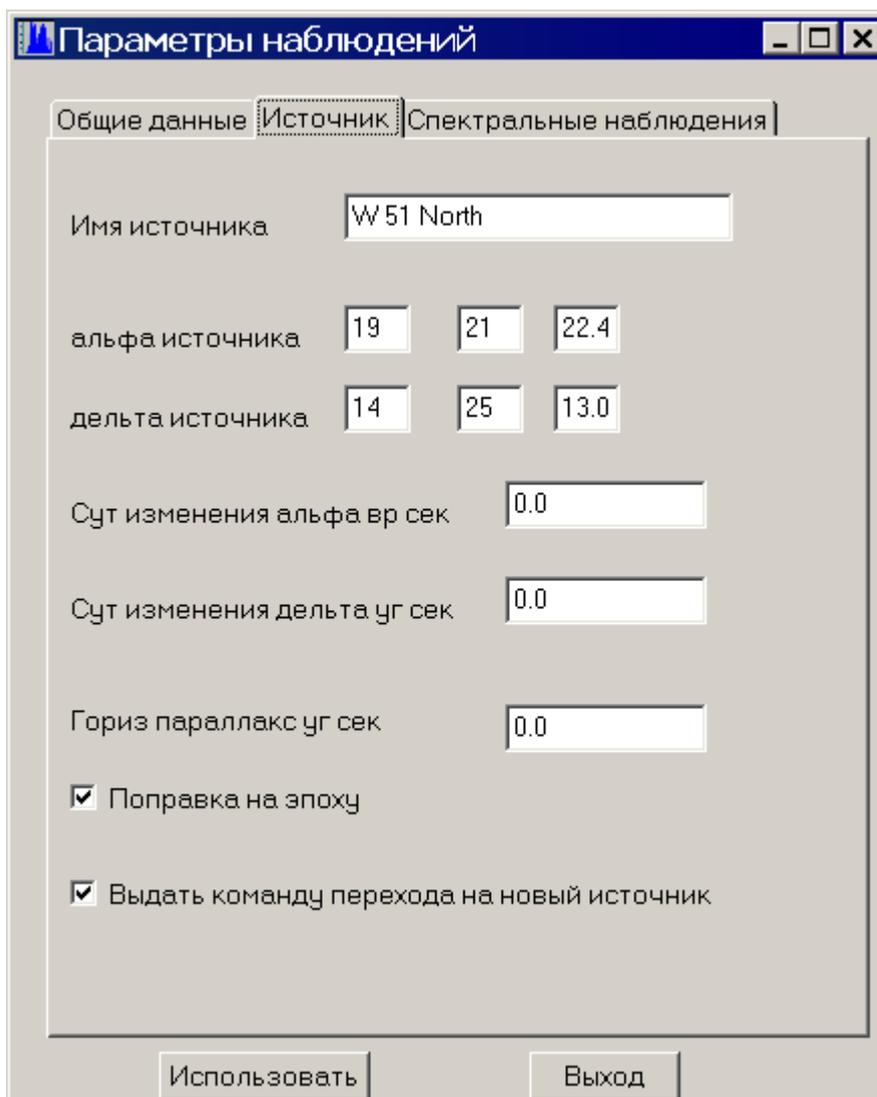
После настройки общих параметров спектральных наблюдений, параметров автокорреляционного приемника и определения места записи спектральных данных на компьютере можно приступить к наблюдениям конкретных источников (см. рис. 12).



**Рис.12.** В меню «Расчет частоты синтезатора» выбирается файл-список источников наблюдений (в начале этого файла – специальная информация для коррелятора для расчета частот, далее – список источников с их названиями и координатами) и конкретный источник в нем (желательно выше, чем  $20^\circ$  над горизонтом, неподалеку от верхней кульминации).

Выставляется необходимая расчетная частота на синтезаторе (учет движения Солнца к апексу, движения Земли по орбите и суточного вращения наблюдателя).

Затем нажатием кнопки «Переписать данные источника» данный источник заносится в таблицу меню «Параметры наблюдений». Теперь можно перейти в него и послать данные на компьютер управления.



**Рис.13.** В меню «Параметры наблюдений» проверяется, какой источник готов для наблюдений и: посылается окончательная команда перехода на него на компьютер оператора РТ-22 (нажатием кнопки «Использовать»).

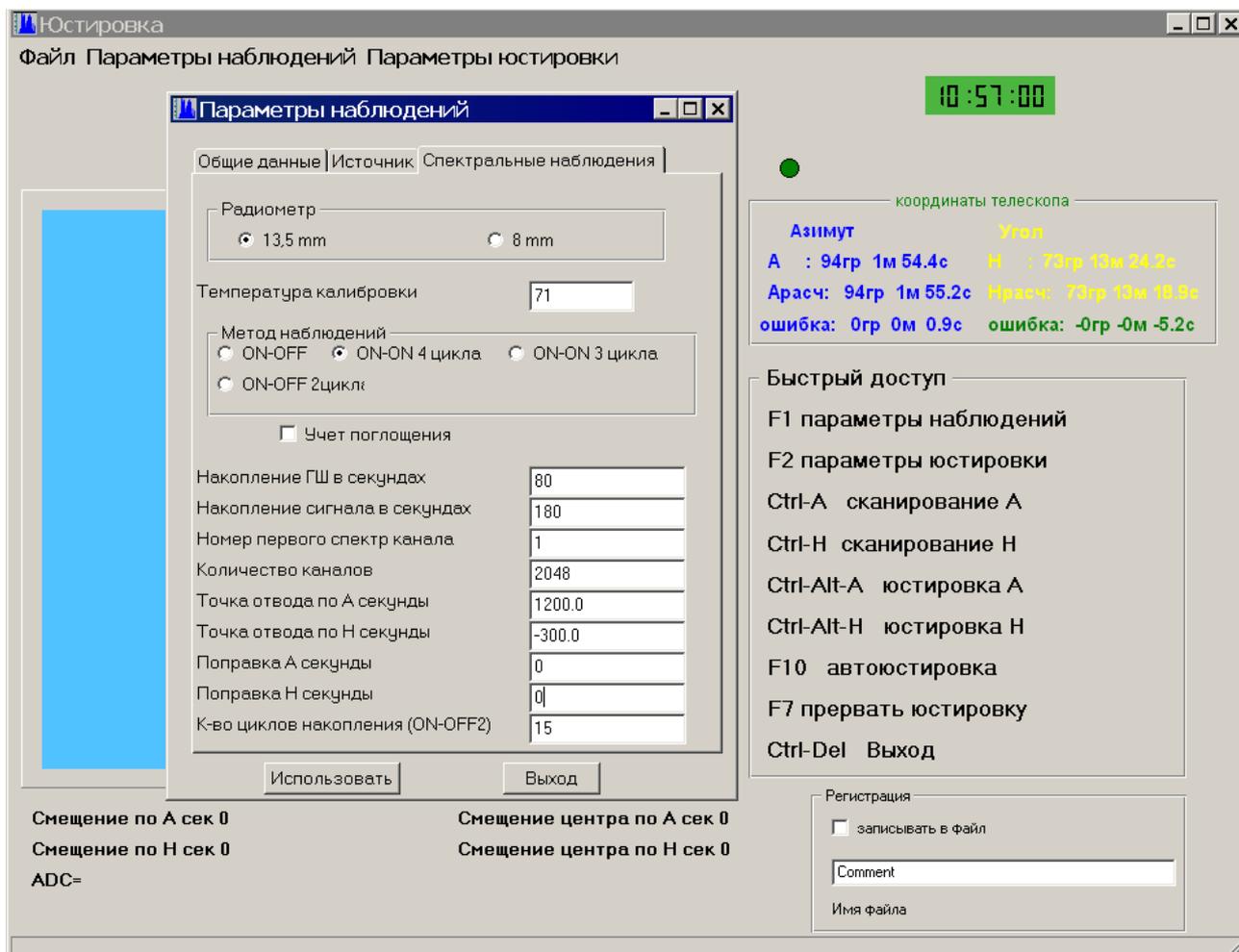
После выполнения всех вышеуказанных процедур (см. рис 8-13) можно запустить наблюдения кнопкой «Запустить» (накопление сигнала).

Однако, если мы желаем получить максимальный сигнал, полный цикл наблюдений включает также юстировку радиотелескопа раз 3-4 часа, особенно в дневное время. Дело в том, нагрев элементов радиотелескопа солнечными лучами с разных сторон приводит к тому, что происходит тепловая деформация элементов конструкции и диаграмма телескопа отклоняется от расчетной. В жаркий летний день отклонение диаграммы может дойти до 90-100", что приведет к падению потока от источника до 2-3 раз. Поэтому необходимо время от времени юстировать направление диаграммы радиотелескопа по ярким источникам (простой точечной структуры).

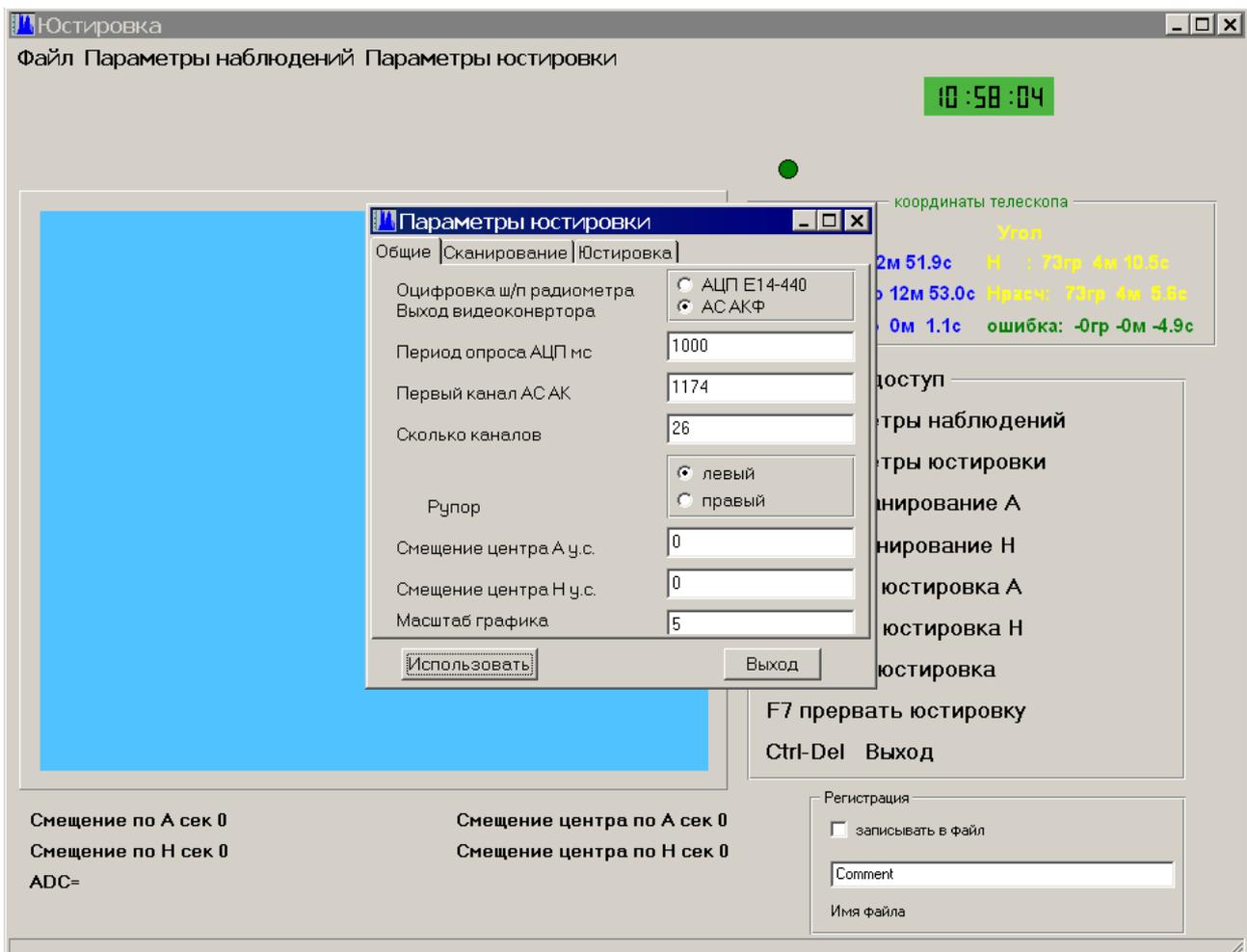
Помимо проверки погодных условий, влияющих на юстировку, раз в полгода-год проверяется в идеальных условиях площадь антенны по источникам с известными потоками (планеты Венера и Юпитер, источник DR 21).

## Юстировка радиотелескопа во время наблюдений.

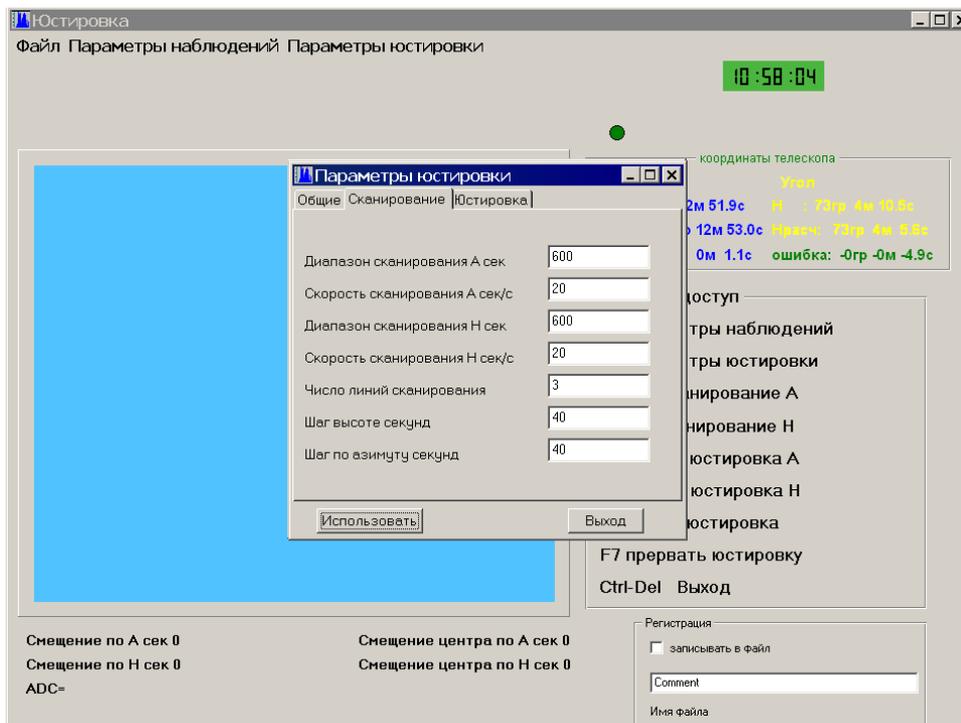
Перед юстировкой радиотелескопа мы должны снять хотя бы один спектр подходящего яркого радиоисточника (с антенной температурой в ярких линиях не менее 20 К) точечной структуры (некоторые мазеры в линии водяного пара имеют двойную и даже тройную структуру, они для целей юстировки непригодны). В спектре такого источника выбирается яркая линия и запоминается канал, в котором она начинается и сколько каналов она занимает. После чего входят в меню «Юстировка», выбирают в различных под-меню общие параметры юстирования, параметры начального сканирования (вначале проводится быстрый съем нескольких сканов для определения зоны последующего более тонкого двухпроходного юстирования).



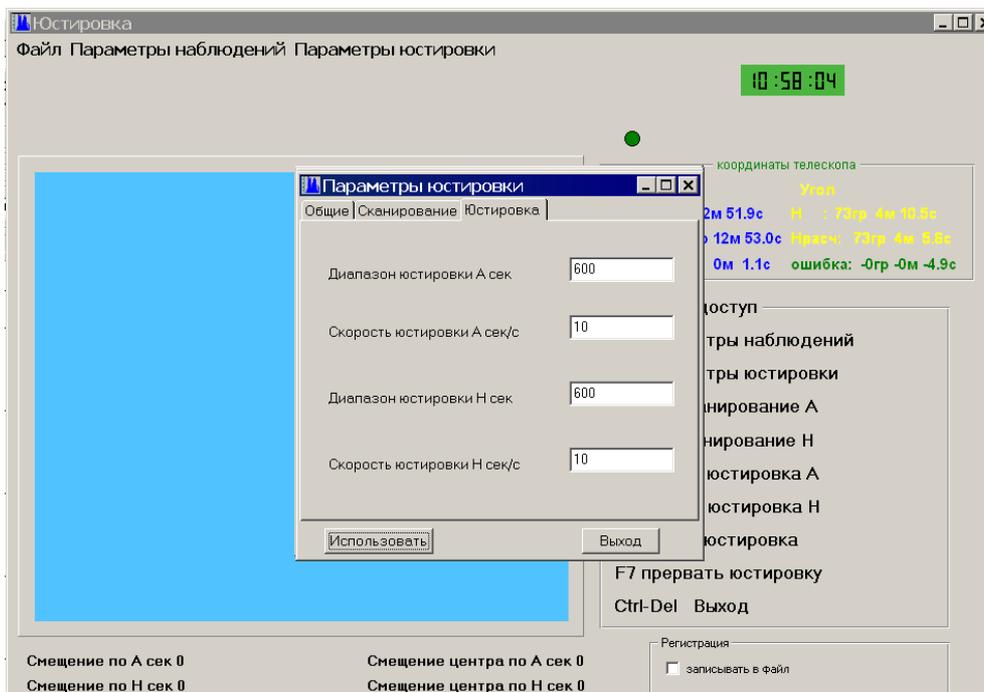
**Рис.14.** В меню «Юстировка» есть аналогичное одному из основных меню программы спектральных наблюдений подменю «Параметры наблюдений». В нем можно выставить поправки по азимуту и углу места – вначале нулевые.



**Рис.15.** В под-меню «Параметры юстировки» выставляется тип приемника (в нашем случае АС АКФ), период снятия опросов (экспозиция спектров), начальный канал на спектре, число каналов, рупор (обычно левый) возможные смещения (обычно 0) и масштабы отрисовки графиков (условно: для деталей в 100 К достаточно примерно единичного масштаба, если деталь меньше по потоку, масштаб необходимо увеличить).



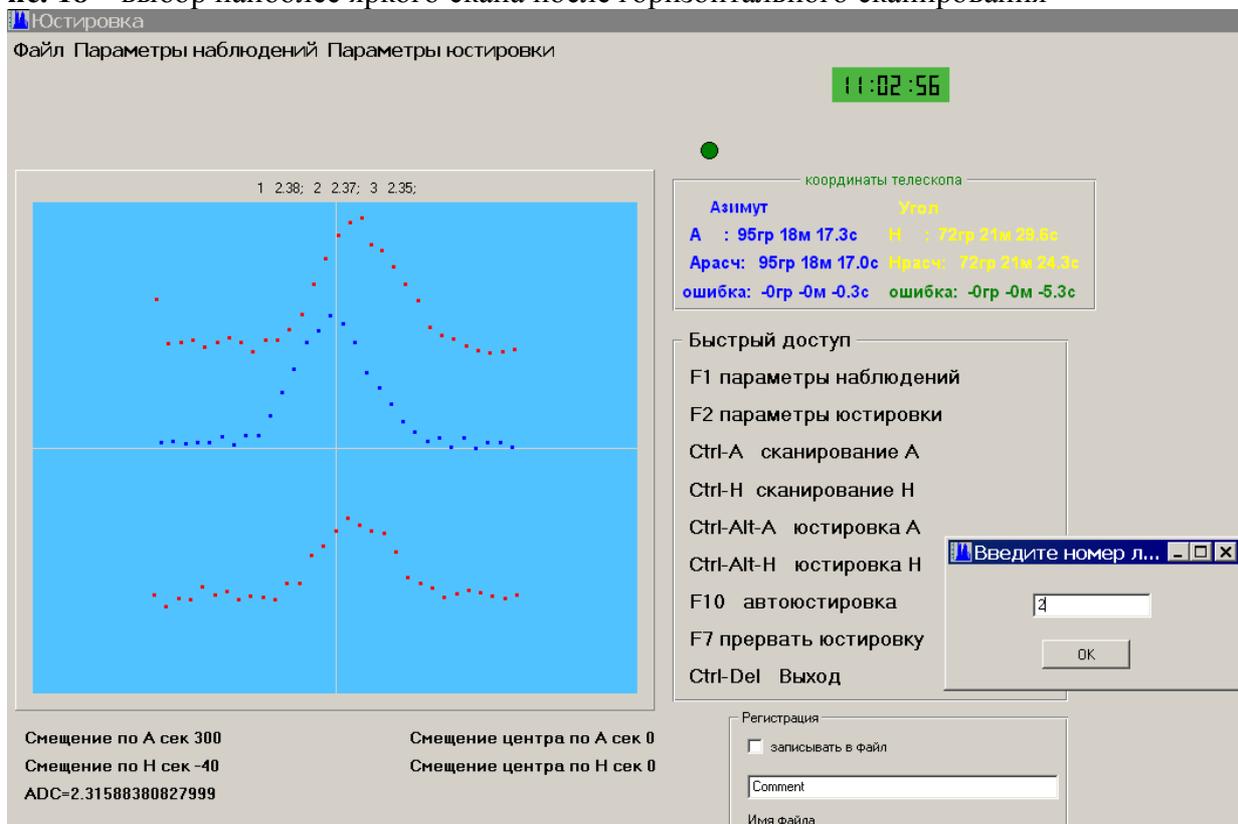
**Рис.16.** В под-меню «Параметры юстировки», опция «Сканирование» определяется число сканов, район сканирования, шаг сканирования (расстояние между сканами) и скорость сканирования – как для вертикальных, так и для горизонтальных сканов. Данные предварительные небесные сканы необходимы для определения скана с наиболее сильным сигналом. Именно по данному скану (вертикальному или горизонтальному) будет произведено окончательное юстирование. Обычно выбирают по 3 горизонтальных и вертикальных скана области 600” со скоростью 20” в секунду, с шагом между сканами в 40”.



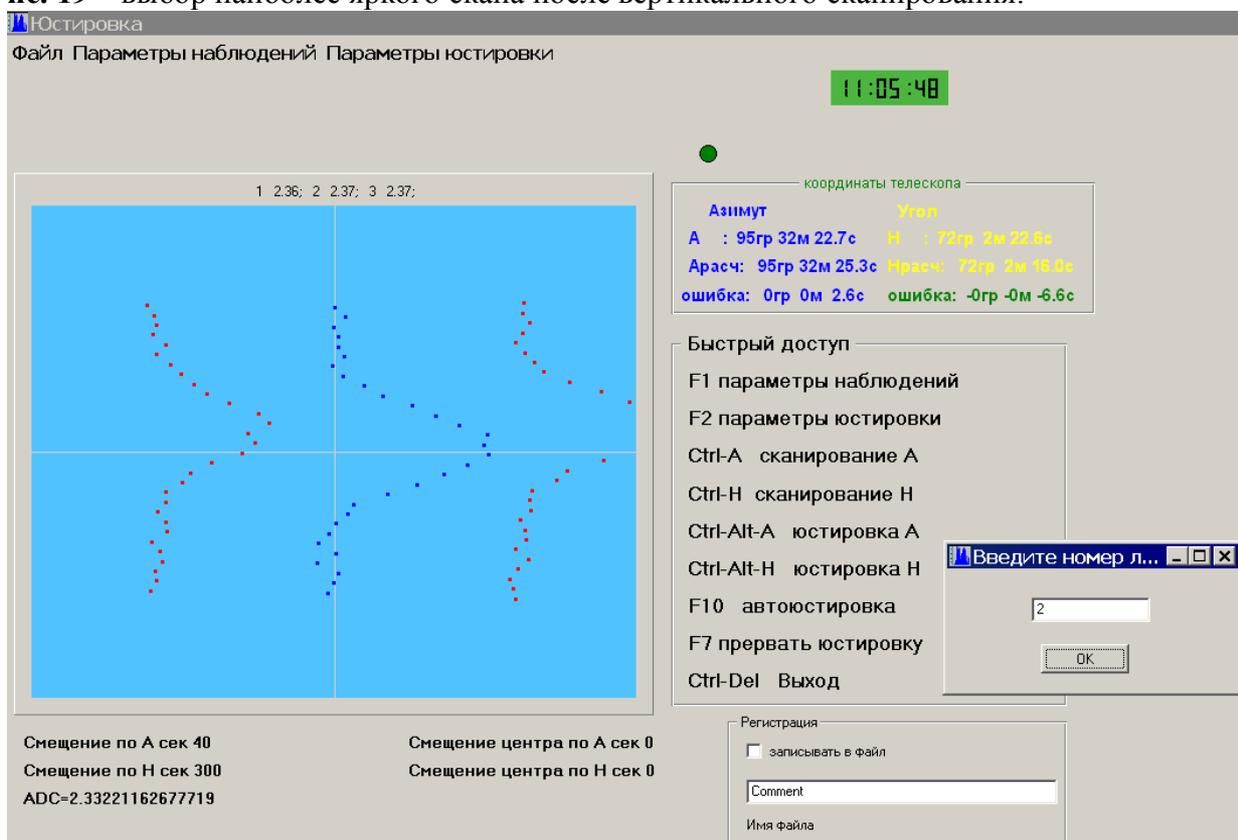
**Рис.17.** Аналогичным образом выбираются заранее параметры окончательного юстирования (2 прохода с разных сторон по одному выбранному скану), обычно с меньшей скоростью 10” в секунду для тщательного съема данных.

Начальное сканирование потом соответственно производится по горизонтальному направлению (Ctrl-A) и вертикальному (Ctrl-H)– см. рис. 12 и 13 ниже. Выбираются наилучшие сканы для последующей юстировки.

**Рис. 18** – выбор наиболее яркого скана после горизонтального сканирования



**Рис. 19** – выбор наиболее яркого скана после вертикального сканирования:



Аналогичным образом производится окончательная юстировка (только после выбора номера скана в предварительном сканировании!): по азимуту (Ctrl-alt-A) и по вертикали (Ctrl-alt-H) – см. рис. 14 и 15 ниже. При этом выводятся поправки.

Рис. 20 – расчет поправок диаграммы антенны по азимуту.

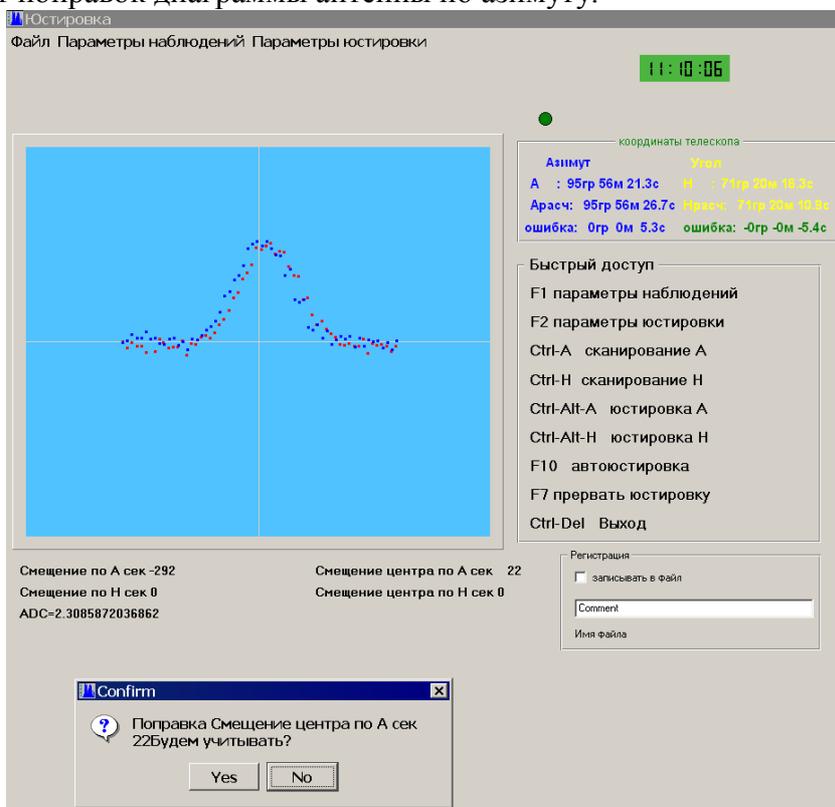
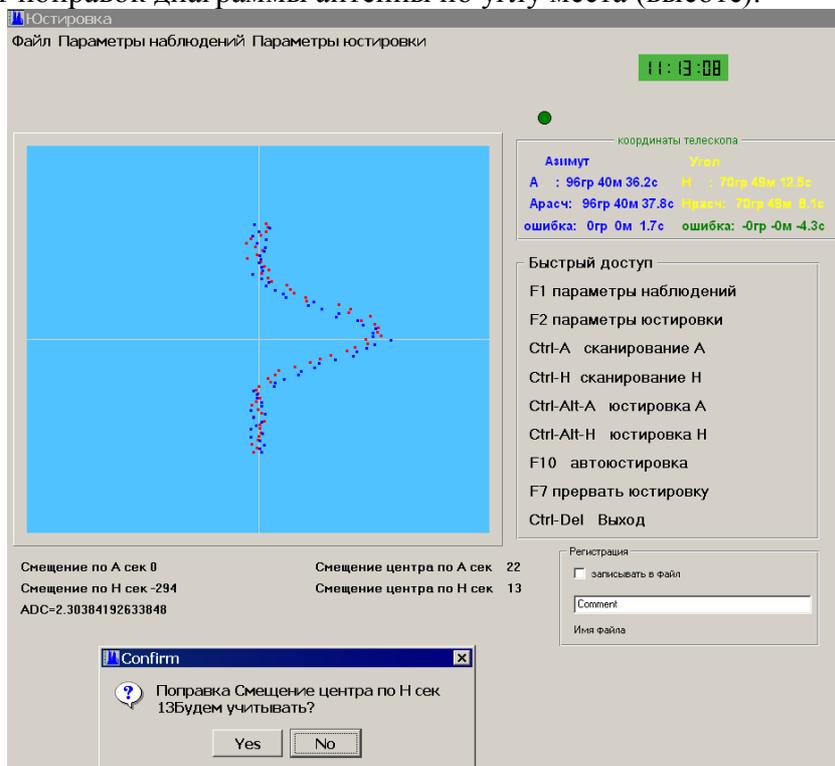
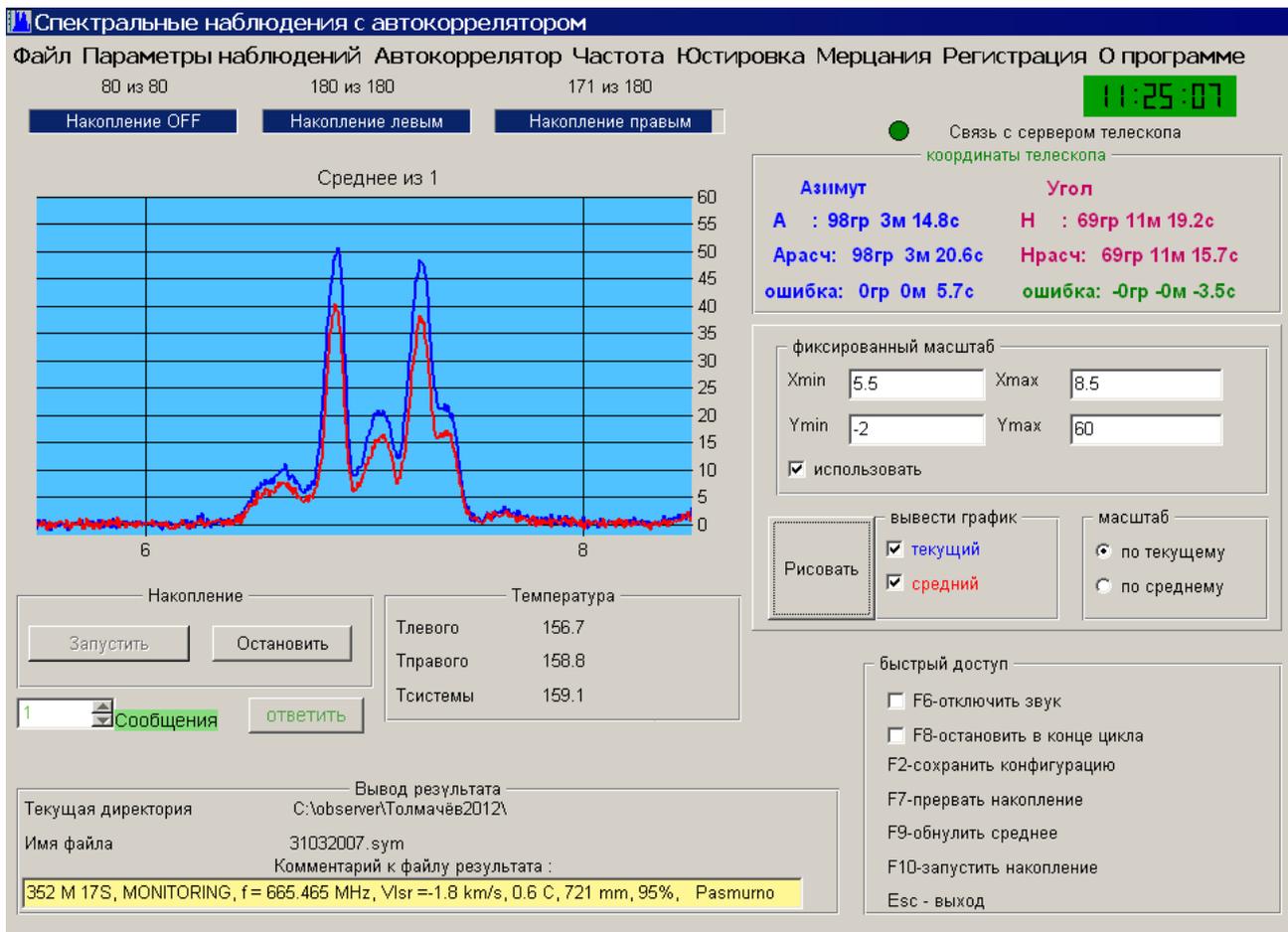


Рис. 21 – расчет поправок диаграммы антенны по углу места (высоте).





**Рис. 22** – зачастую после юстировки диаграммы антенны плотность потоков в линиях мазерных источников ощутимо возрастает (от 20-30% до 2-3 раз).

Такие юстировочные поправки в условиях ясного неба днем желательно проводить раз в 2-3 часа, при этом стараясь в целом сохранять взаимное положение радиотелескопа и угол между диаграммой и направлением на Солнце. Подобная юстировка не требуется ночью. Не нужна она иногда и днем – в условиях пасмурной погоды.

Именно аккуратное проведение юстировок, регулярное слежение за поправками телескопа (они могут слегка различаться зимой и летом), введение правильных погодных условий в параметры наблюдений (от них зависит коэффициент поглощения атмосферы в зависимости от высоты источника над горизонтом) и т.п. – определяет многолетнюю стабильность спектральных данных. Как показывает практика, обычно от наблюдения к наблюдению инструментальная ошибка не превышает  $\pm 15\%$  по потокам. Данное обстоятельство позволяет активно использовать спектральные данные для стабильного мониторинга космических мазеров на масштабах от минут до многих лет. После накопления массива спектров их можно будет обработать, и об этом – во второй части лабораторной работы.

## Часть II: Обработка результатов многолетних спектральных наблюдений на РТ-22 ПРАО.

### Наблюдательные данные.

В числе объектов наших наблюдений присутствуют как области звездообразования, так и звезды поздних спектральных классов. В рамках лабораторной работы разбираются несколько источников мазерного излучения обоих типов.

В лабораторной работе представлены спектры и проведен анализ их вариаций за все время наблюдений для источников (см. таблицу 1):

Таблица 1: основные данные о наблюдательных источниках.

№	Источник	$\alpha(1950)$	$\delta(1950)$	$V_{LSR}$ км/с	$Flux_{peak}$ (Jy)
1.	WB 652	5 27 31	33 45 12	-12.0 ... +4.0	~ 100
2.	GGD 4	5 37 21.8	23 49 24	-3.0 ... +10.0	~ 10 ... 1000
3.	V391 Cyg	19 39 26	48 40 26	-30.0 ... -17.0	~ 50
4.	DR Cyg	20 41 47	37 59 2	+5.5 ... +18.5	~ 10

### Используемое программное обеспечение:

А) Spectra.exe – считывает списки спектров избранных источников с полосового приемника (данные 1979-2004 гг). Программа работает под системой MSDOS, поэтому к ней прилагается программа DOSBOX 0.73 (либо нортон-подобная утилита Far), графический драйвер egavga.bgi и русификатор keyrus.com

Б) Программа для просмотра спектров с автокорреляционного приемника Spectral\_analysis.exe

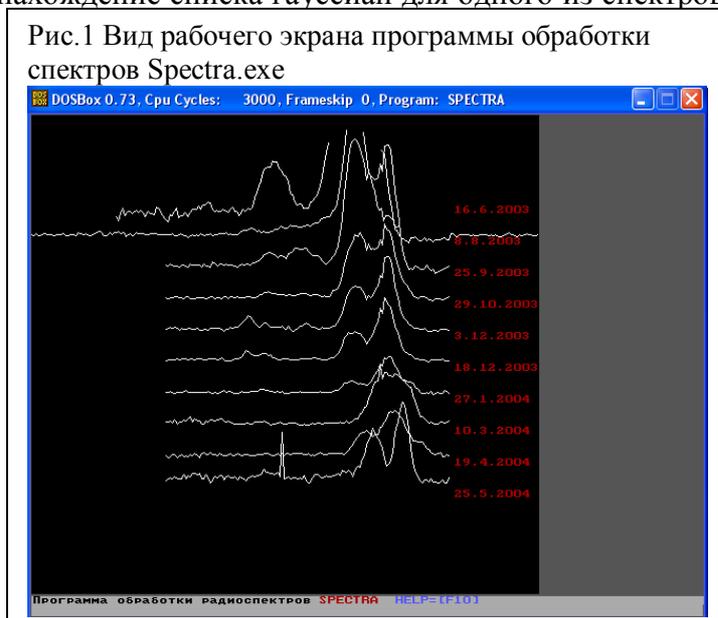
В) Графер OriginLab 7.0

### Просмотр и обработка спектральных данных

**Работа в программе Spectra.exe.** Запускаем программу для демонстрации через DOSBOX 0.73 (необходимо примонтировать директорию, где лежит программа Spectra.exe, как диск С, и запустить ее с этого диска после запуска русификатора key.bat). При вызове программа Spectra.exe запрашивает список источников, с которым будем работать. Задаем список источников a\_ggd4, и после запуска программы устанавливаем нужные масштабы по осям горячими клавишами [8], [9] и [-], [+].

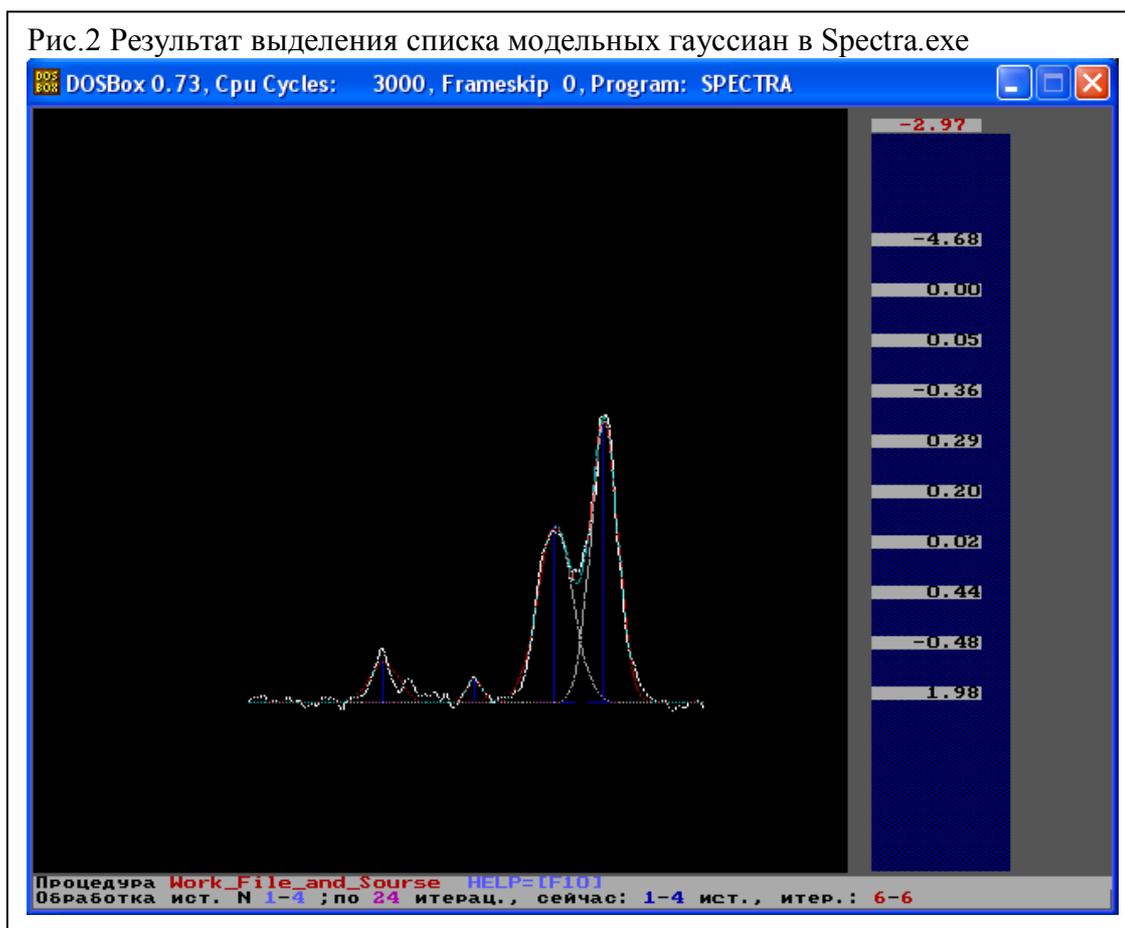
Вызов описания программы Spectra.exe и файла помощи по клавишам управления – клавишей [F10]. В основном описании перечисляются, в частности, как можно просчитать суммы потоков в заданных интервалах, центры масс спектров и т.д., и т.п. В данной лабораторной работе опишем лишь работу-моделирование спектров списками гауссиан.

Пролистываем спектры клавишами [PageUp], [PageDw] и, в качестве примера, на последнем экране готовимся выполнить нахождение списка гауссиан для одного из спектров – на дату 3.12.2003 г. (рис. 1).



## Практическое задание по нахождению списка гауссиан, имитирующих спектр.

В программе Spectra.exe нажимаем [H] (поиск набора модельных гауссиан), в ней – перебором [D] выбираем нужный спектр (в данном случае 5-й) и запускаем поиск начального приближения списка клавишей [F5]. ... В получившемся списке (всюду в программе можно вызывать подробные подсказки клавишей F10) убрать явно неверные модельные гауссианы (ложные, отрицательные по бокам сильных гауссов) в процедуре работы со списком Work\_File\_and\_Source , и запустить его в процедуру подгонки клавишей [U]. Правильность подгонки можно проверить отрисовкой списка гауссиан [O] , выводом их списка [n] и наложением-выводом начальных данных [I]. На рис. 2 – результат работы. Сохранение списка полученных гауссиан в текстовый файл клавишей F1 (временный файл) либо F3 (дописываемый журнал обработки).



## Просмотр и обработка спектральных данных в программе OriginLab 7.0.

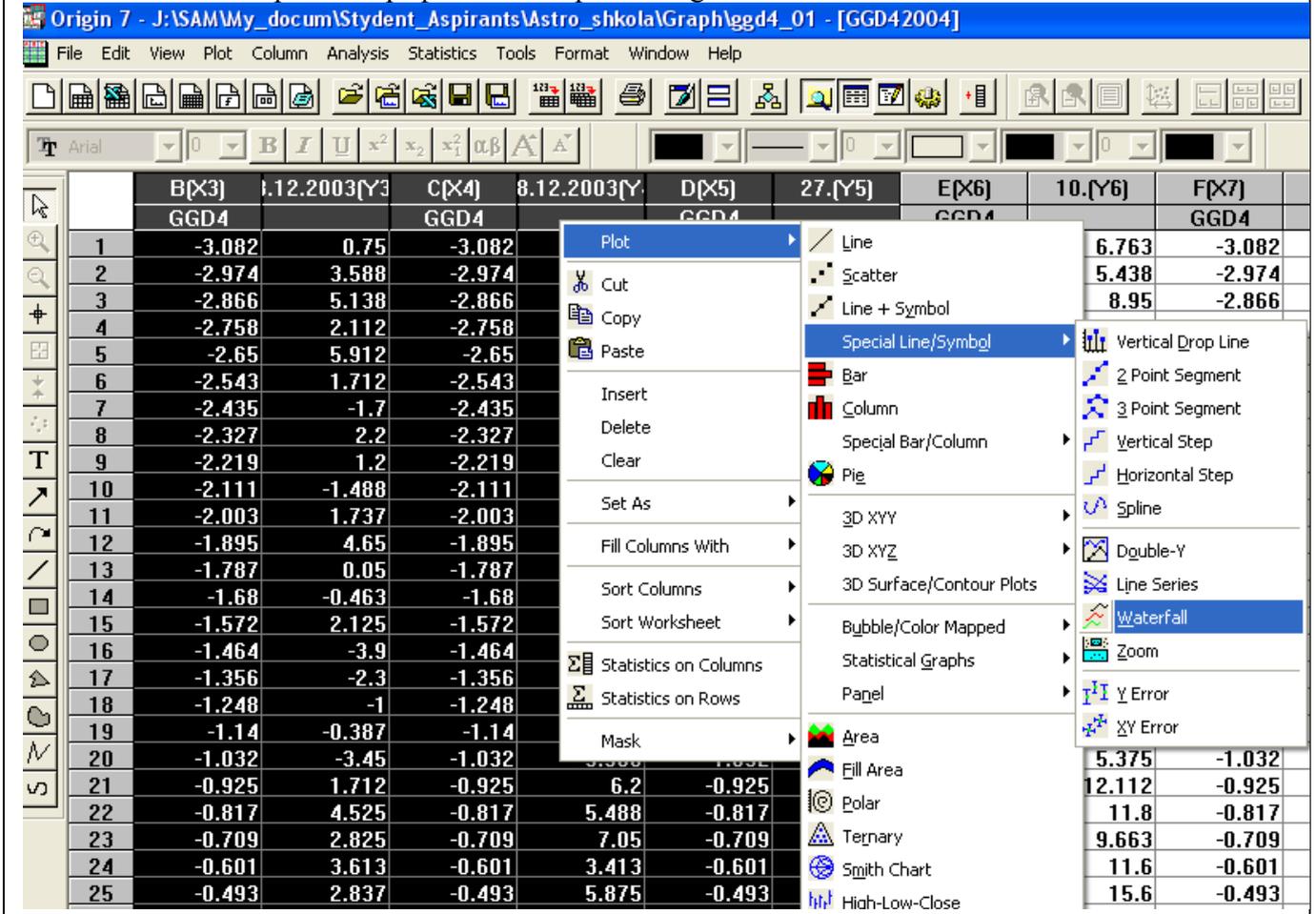
Большинство работ по обработке спектральных данных можно проделать в графере OriginLab 7.0.

Считывание данных можно осуществить считыванием данных кнопкой Import Multiply ASCII - в начальный текстовый табличный шаблон данных.

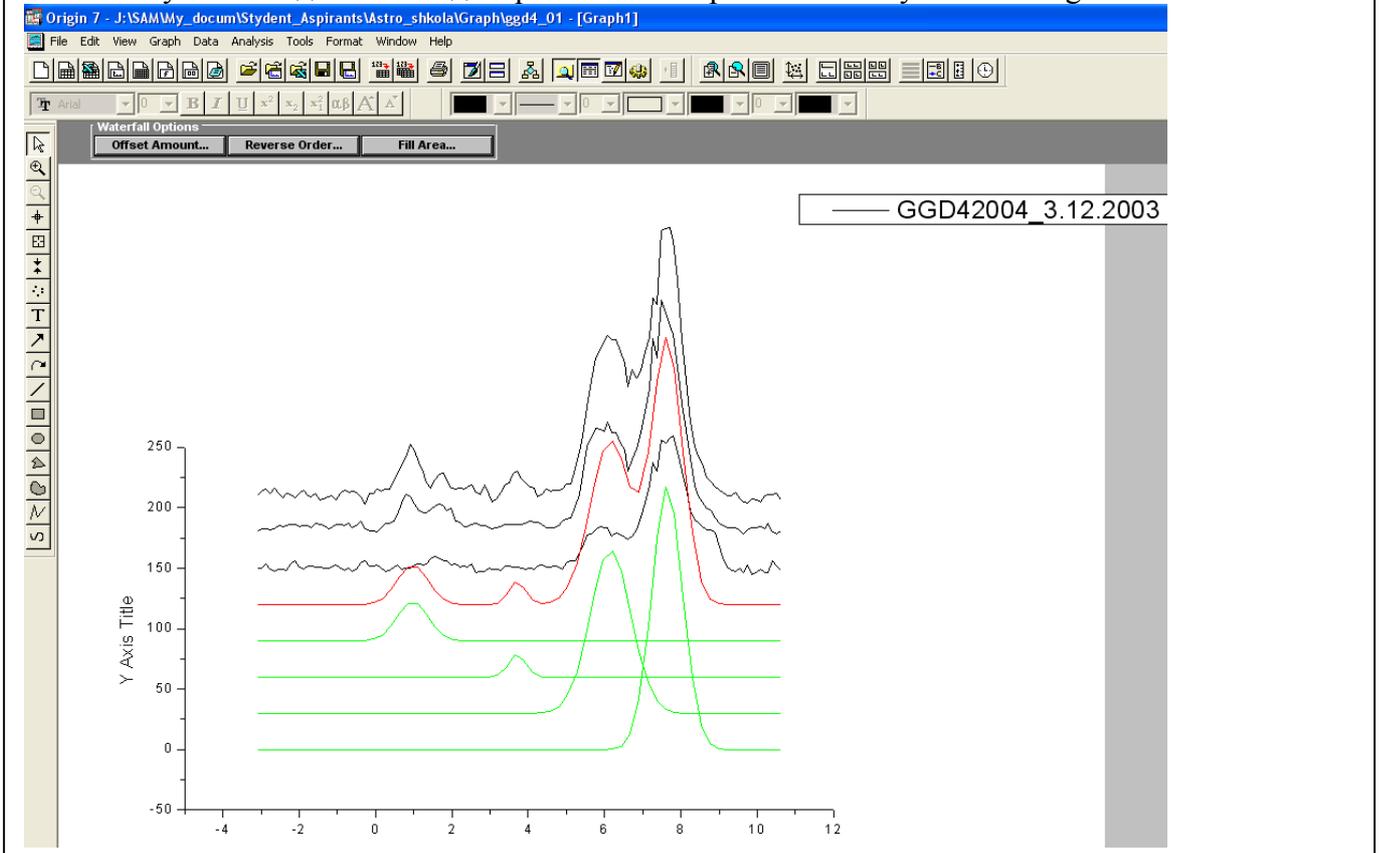
Назначив правильно оси X и Y, можно затем построить несколько спектров на одном графике – выбрав предварительно нужные столбцы в таблице и нажав правой кнопкой мыши последовательно разворачивающиеся меню Plot→Special Line/Symbol → Waterfall - см. рис. 3. Затем необходимо отрегулировать график (начальные сдвиги спектров по осям и их цвета).

Чтобы смоделировать спектр набором гауссиан, необходимо в меню OriginLab 7.0 выделить Analysis→Fit Multi-peaks → Gaussian , назначив нужное число гауссов (здесь – 4, см. рис. 4) и выбрав их начальные положения.

**Рис.3** Начало построения графиков спектров в OriginLab 7.0



**Рис.4** Результат выделения моделирования спектра списком гауссиан в OriginLab 7.0



В результате нам будет выданы данные (см. рис. 4):

Gauss(4) fit to GGD42004\_3.12.2003:

Chi<sup>2</sup>/DoF 37.71756 R<sup>2</sup> 0.98877

Peak	Area	Center	Width	Height
------	------	--------	-------	--------

1	33.157	0.97464	0.83061	31.851
2	10.675	3.7105	0.44981	18.935
3	180.56	6.1562	1.0662	135.12
4	221.88	7.6375	0.81170	218.10

Сравним с результатами работы нашей программы Spectra.exe:

Протокол обработки-получения гауссов источника GGD4

Year Vel Flux Width for Gauss of GGD4 3 12 2003

2003.925 0.984 2.49 (в Ян = 31.125) 1.020

2003.925 3.710 1.52 (в Ян = 19.0) 0.530

2003.925 6.156 10.81 (в Ян = 135.125) 1.257

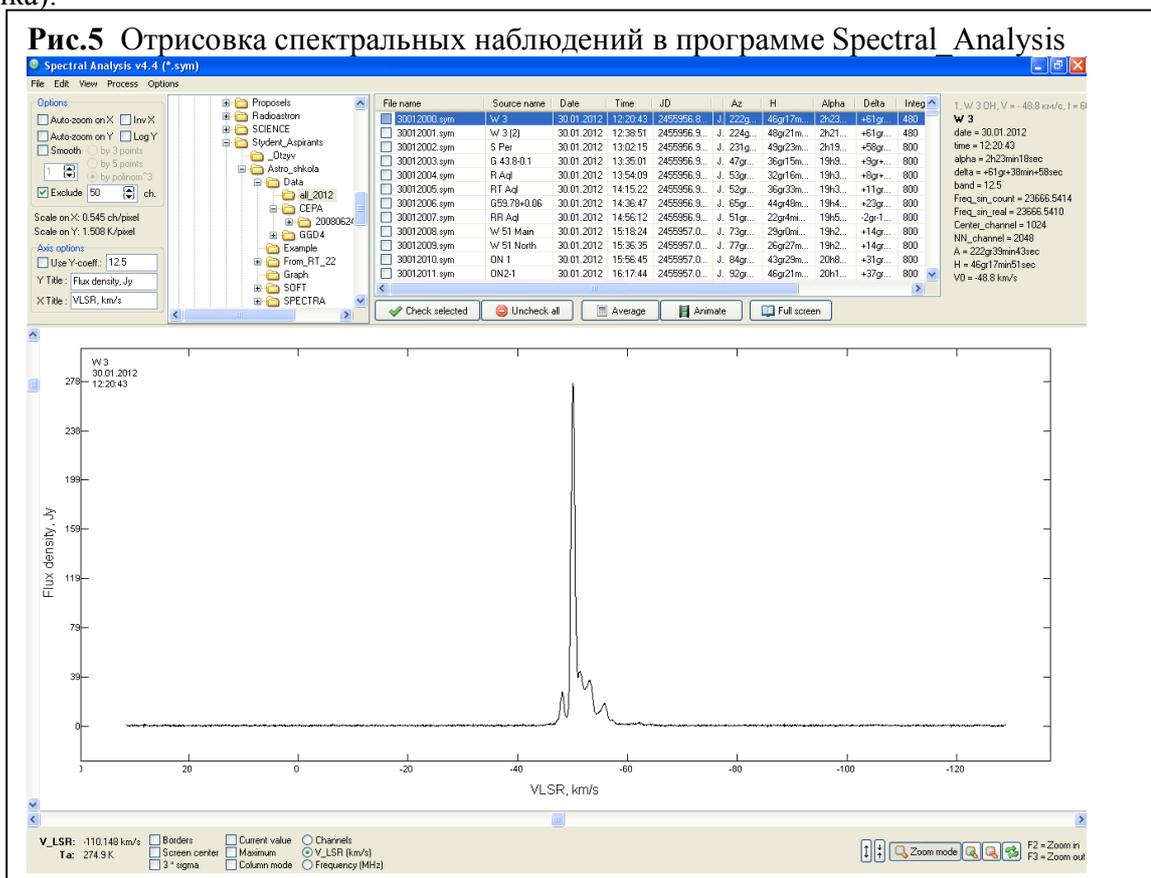
2003.925 7.637 17.45 (в Ян = 218.125) 0.956

Налицо – практически полное совпадение, за исключением того, что в программе Origin все гауссианы получаются заметно уже (вероятно, это разница обусловлена различием алгоритмов вписывания).

### Работа в программе Spectral\_Analysis.

Спектры с автокорреляционного приемника можно просмотреть, отсортировать, провести беглый анализ качества наблюдений, анимировать избранные данные и т.д. – в программе Spectral\_Analysis (автор – Дмитрий Ладейщиков).

Поскольку работа в ней довольно проста и очевидна, покажем в учебных материалах лишь внешний вид программы (см. рис. 5). Все ее возможности очевидны из ее нескольких меню сверху и разнообразных кнопок вокруг графика выбранного спектра. Не вполне очевидна лишь одна опция: нажав на соответствующие столбцы таблицы спектров можно сортировать спектры в соответствии с избранным в столбце параметром (дата либо название источника).



## Для чего все это надо?

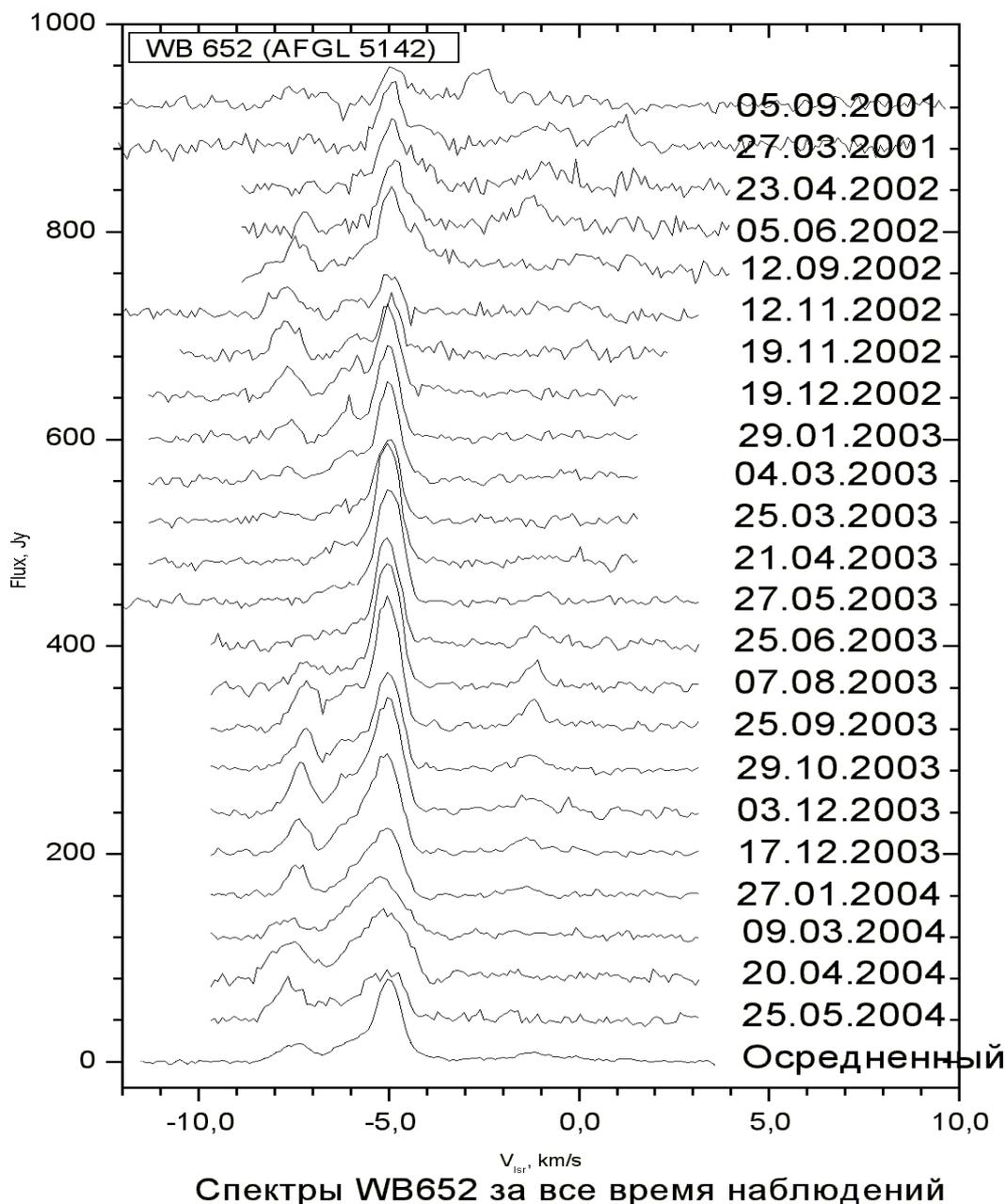
Итак, мы бегло ознакомились с возможностями программ просмотра и обработки спектральных данных. Но: для чего это все нужно? Рассмотрим на дальнейших примерах законченной обработки данных для четырех различных космических мазеров, как именно можно использовать полученные результаты и их как трактовать.

## Результаты обработки данных и их возможная интерпретация.

В процессе обработки данных наблюдений найдено для каждого источника:

1) **WB652** (или AFGL 5142, наблюдения 2001 -- 2004 гг.) - найдено, что космический мазер в данной области звездообразования ведет себя на представленном временном отрезке довольно стабильно.

Рис. 6.



Мы наблюдали (рис. 6) устойчивую группу спектральных деталей на интервале  $-10.0 \dots +3.0$  км/с с потоком порядка нескольких десятков Ян в линии. Из анализа вариаций потоков на разных участках спектра найдено, что левая часть спектра на оси лучевых скоростей в 2001 – 2004 гг. изменяла свой поток в противофазе с потоком с правой половины спектра. В то время как поток от правой зоны спектра ( $-3.3 \dots +1.5$  км/с) рос, поток от левой зоны спектра ( $-9.5 \dots -3.4$  км/с) падал (рис. 7). Такая антикорреляция потоков достаточно типична, например, для диско- и торо- образных структур вокруг молодых звезд. Другое возможное объяснение, что данное излучение порождено двумя биполярными струями от молодой звезды. Но отсутствие сильных смещений спектральных деталей (см. разложение спектров на гауссовы компоненты на рис. 8) позволяет предположить, что в данном случае мы скорее имеем дело с торообразной структурой около молодой звезды диаметром несколько десятков а.е., в которых возникло явление конкуренции за накачку излучения между противоположно движущимися к нам частями газовой-пылевой тора.

Рис. 7.

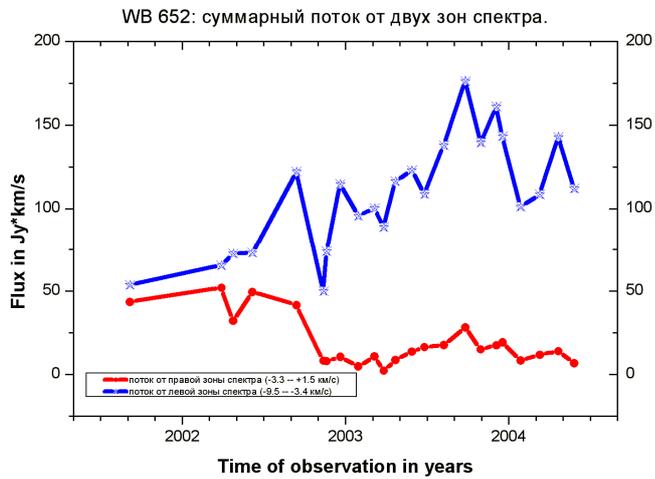


Рис. 8.

Представление спектров в виде наборов гауссиан для всех наблюдательных данных WB652 (отступами обозначены полуширины гауссиан).

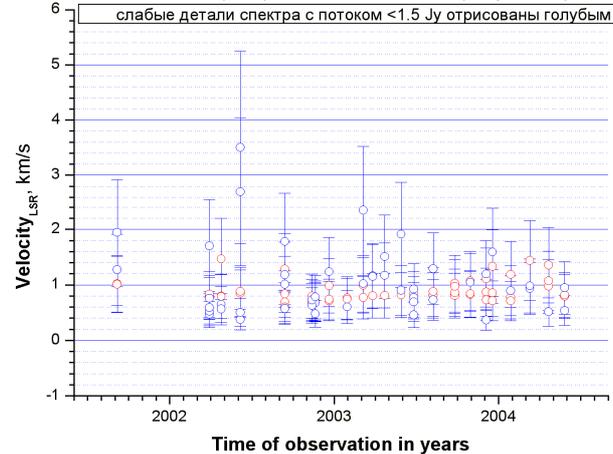
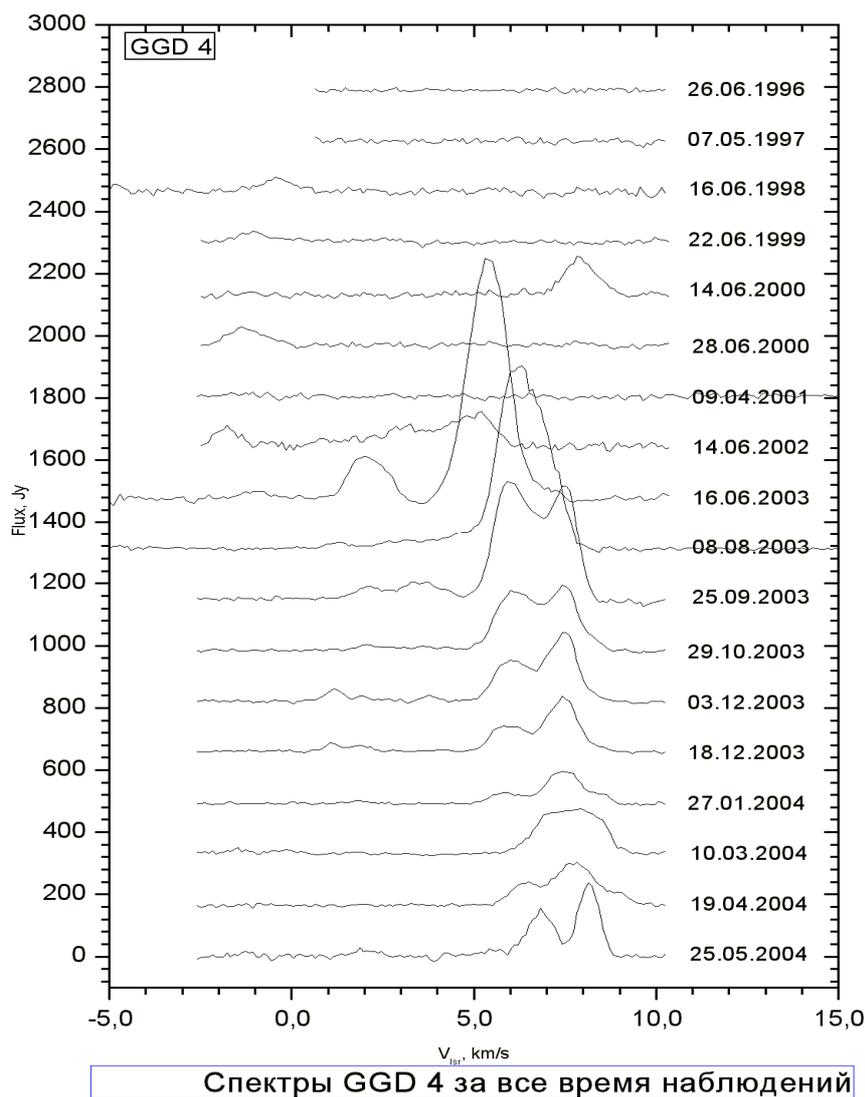


Рис.9. Спектры космического мазера GGD4



2) **GGD4** (1996 -- 2004 гг.) - найдено, что космический мазер в данной области звездообразования ведет себя на представленном временном отрезке крайне нестабильно (см. рис. 9). Большую часть времени он демонстрирует достаточно слабый поток (порядка нескольких десятков Ян) в линии либо полное отсутствие наблюдаемого потока излучения (т.е. ниже 5 Ян). Однако в 2003 г. данный источник отметился неожиданно мощной вспышкой до 1000 Ян потока в линии. Причем заметно, что вспышка, возникнув в виде мощной детали в зоне лучевых скоростей  $\sim + 5.5$  км/с (июнь 2003), привела к распадению ее на группу и устойчивое смещение ее в зону  $\sim + 7.5$  км/с (конец мая 2004). Наиболее адекватное объяснение этому можно дать, если считать, что данная вспышка происходит в мощной струе вещества с излучающими ускоряющимися мазерными конденсациями.

Рис. 10. Спектры космического мазера V 391 Cyg

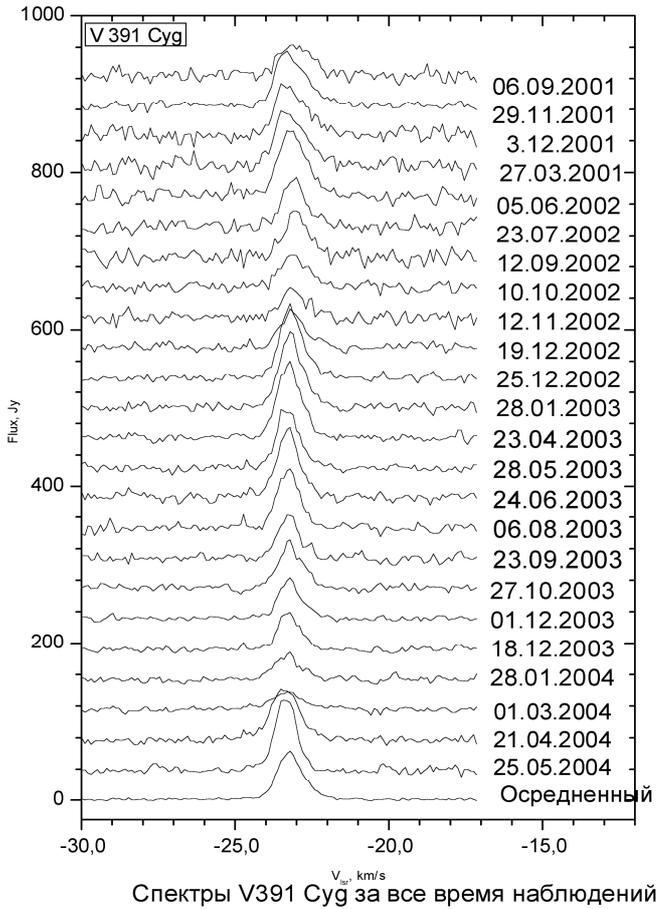
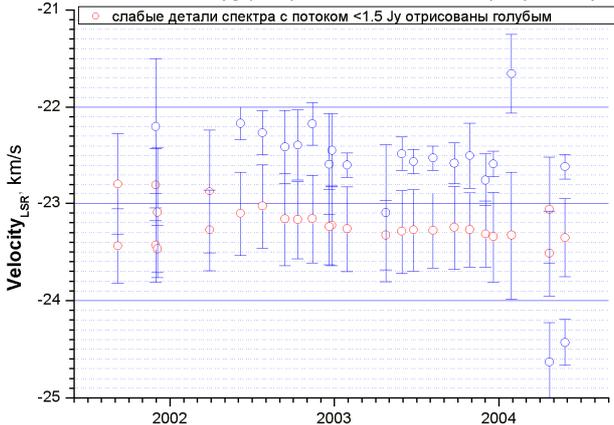


Рис. 13.

Представление спектров в виде наборов гауссиан для всех наблюдательных данных V 391 Cyg (отступами обозначены полуширины гауссиан).



3) V391 Cyg (2001 -- 2004 гг.) – найдено (см. рис. 10), что космический мазер для данной звезды позднего спектрального класса показывает переменный поток порядка в диапазоне 30-80 Ян в линии на скорости  $V_{LSR} = 23.1$  км/с. Приблизительный период изменения потока составляет порядка 500 суток (рис. 11), причем поведение потока в линии водяного мазера хорошо повторяет (с некоторой задержкой в 50 – 100 дней) поведение блеска данной переменной звезды в оптике (рис. 12). Сама главная деталь спектра обычно устойчиво разлагается на две гауссианы (рис. 13: в районе  $-22.5$  и  $-23.3$  км/с), которые, наиболее вероятно, порождаются излучением с противоположных частей газовой-пылевой оболочки вокруг данной звезды позднего спектрального класса.

Рис.11.

V 391 Cyg: поведение суммарного потока мазера H<sub>2</sub>O

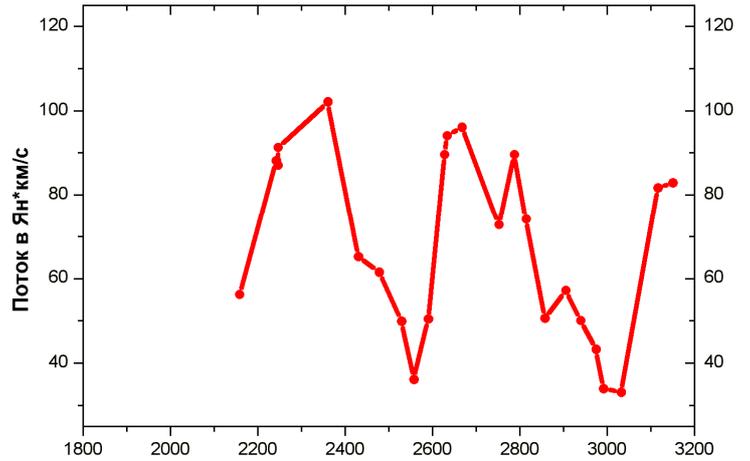


Рис. 12. Колебания блеска звезды V 391 Cyg за тот же период по данным [www.aavso.org](http://www.aavso.org)

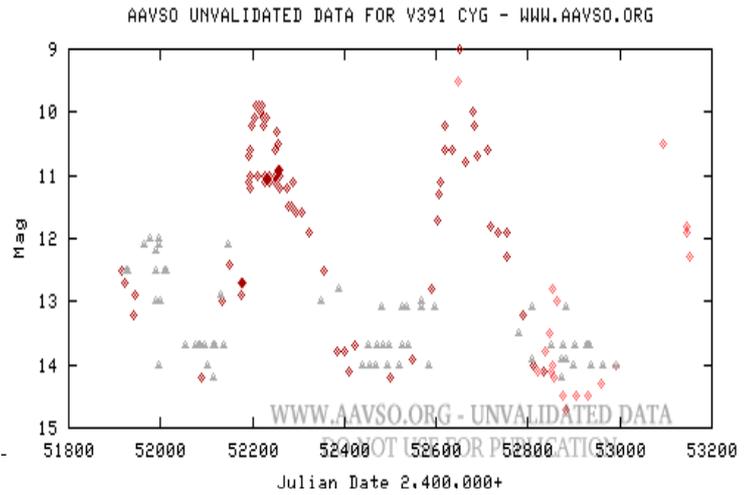
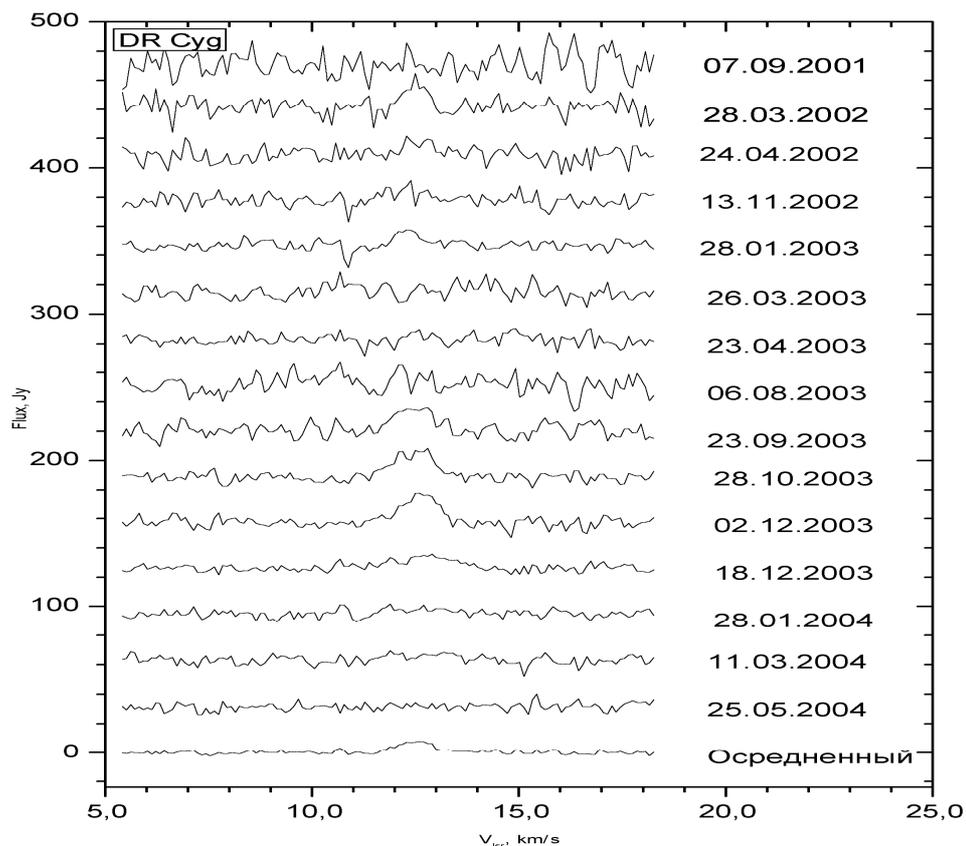
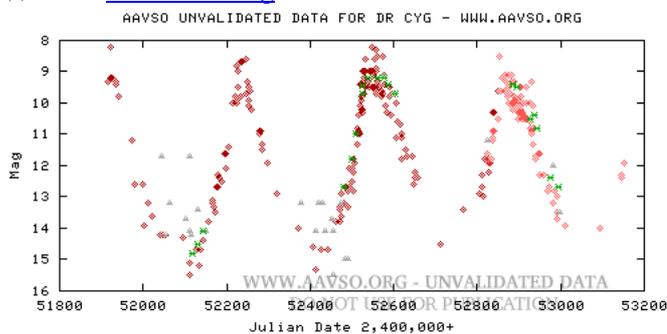


Рис.14. Спектры DR Cyg



Спектры DR Cyg за все время наблюдений

Рис. 15. Колебания блеска звезды DR Cyg по последним данным [www.aavso.org](http://www.aavso.org)



4) **DR Cyg** (2001 -- 2004 гг.) - найдено, что космический мазер для данной звезды позднего спектрального класса (характерное поведение ее оптического блеска отражено на рис. 14) показывает слабый поток порядка 10 Ян в линии на  $V_{LSR} = 12.7$  км/с (рис. 15), временами эта деталь исчезает с приблизительно периодичностью 300-400 суток. Ввиду крайней слабости данной детали ее изучение затруднительно. Однако можно отметить, что периоды ее наилучшей видимости опять же, хорошо согласуются с максимумами блеска звезды в оптике.

### Заключение.

Итак, на конкретных примерах мы убедились, что спектральные наблюдения и обработка данных космических мазеров H<sub>2</sub>O дают богатый материал для физической интерпретации строения и эволюции данных объектов.

**Практическое задание.**

Перед вами – часть спектра космического мазера W43M3 на дату 26.12.1990 г.

Лучевая скорость для канала под номером 57 (номера каналов – показаны внизу, скорость возрастает слева направо) относительно локального местного стандарта  $V_{lsr} = 104.85$  км/с. Приведена яркость (второй снизу ряд цифр) – в антенных градусах,  $1K = 12.5$  Ян. Ширина одного спектрального канала  $0.1011$  км/с.

**Задание.**

- А) Назовите интервал лучевых скоростей приведенного участка спектра.
- Б) Сколько гауссиан (отдельных спектральных деталей) вы видите на графике?
- В) Определите положение центров на оси лучевых скоростей, и ширину найденных гауссиан на уровне  $\frac{1}{2}$  потока в линии.
- Г) Определите полный поток в Ян для приведенного участка спектра.

