

# Пакет ScoRe для обработки данных, полученных на спектрографе SCORPIO в длиннощелевой моде

О.В.Марьева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

## Аннотация

Главное преимущество пакета ScoRe заключается в том, что он создан специально для данных со SCORPIO.

## 1 Введение

Резкое увеличение числа наблюдательных данных изменило требования к пакетам программам для обработки спектрального материала. Сейчас практически невозможен “классический” подход к обработке астрономических спектров, предполагающий прямое участие астронома в процессе редукиции. Возникновение больших архивов наблюдательных данных требуют создания универсальных программ, простых в использовании и практически не требующих участия наблюдателя. Главное – программы должны быть понятными даже пользователям малознакомым, или даже незнакомым, с особенностями спектрографа.

На большом телескопе азимутальном (БТА) Специальной астрофизической обсерватории (САО) с 2000 года проводятся наблюдения с фокальным редуктором светосилы SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations) (Afanasiev & Moiseev, 2005). За 10 лет со SCORPIO провели 780 наблюдательных ночей. Большинство наблюдательных программ на SCORPIO – длиннощелевая спектроскопия. Все эти данные находятся в Общем архиве наблюдательных данных БТА (<http://oasis.sao.ru/oasis/cgi-bin/fetch?lang=ru>) в открытом доступе.

В данной работе мы представляем пакет программ ScoRe, специально разработанный авторами для первичной редукиции данных, полученных на БТА САО с фокальным редуктором светосилы SCORPIO в режиме длиннощелевой спектроскопии. Этот пакет программ много раз тестировался. Он успешно апробирован на данных, полученных с гризмами VPHG 1200G, VPHG 1200R, VPHG 550G, VPHG 1800R, VPHG 400 и с щелями шириной 1" и 0"75. В ScoRe входят как стандартные для длиннощелевой спектроскопии процедуры, которые присутствуют во всех системах обработки, так и специфические (экстракция различными способами, расчет ошибок, создание карты окрестностей). Такое объединение процедур помогает значительно сократить время обработки.

## 2 Общая характеристика

ScoRe пакет программ с многооконным интерфейсом (рис. 1), написанный на языке IDL. В данный пакет мы объединили процедуры, написанные В.Л.Афанасьевым, А.В.Моисеевым, П.К.Аболмасовым и О.В.Марьевой в разное время.

ScoRe включает в себя все стандартные этапы редукиции длиннощелевых спектров:

- удаление следов космических частиц
- вычитание BIAS
- исправление искривление изображения<sup>1</sup>
- деление на плоское поле

---

<sup>1</sup>искривление изображения возникает из-за аберраций дифракционной решетки.

- построение дисперсионной кривой и линейаризацию
- коррекцию дисперсионной кривой за орбитальное движение Земли (приведение к барицентру)
- нормировку на спектральную чувствительность

Кроме того, в пакет входят дополнительные процедуры, позволяющие осуществлять:

- автоматическое создание logfile
- коррекцию направления дисперсии
- экстракцию спектра (ScoRe позволяет экстрагировать спектр тремя различными способами)
- расчет ошибок
- создание карты окрестностей

В ScoRe имеется режим (“Multiframe”) для обработки большого количества коротких экспозиций (апробирован на серии из двухсот сорока изображений) и создания “куба данных” спектральной переменности (третья координата – время). Этот режим предусмотрен для исследования спектральной переменности. Он включается автоматически если экспозиций объекта больше 10.

Изучать спектральную переменность можно и в случае  $1 < N_{\text{экспозиций}} < 10$ . Для этого предусмотрен режим “Spectral series regime”, который включается с помощью соответствующего ключа.

## 2.1 Установка и использование

Для успешной работы программы необходимо, чтобы на компьютере был установлен язык IDL версия 6.2 и позже. Пакет программ ScoRe представляет собой архив состоящий из собственно программ, калибровочных таблиц, описания пакета в pdf-формате и установочного файла score.batc.

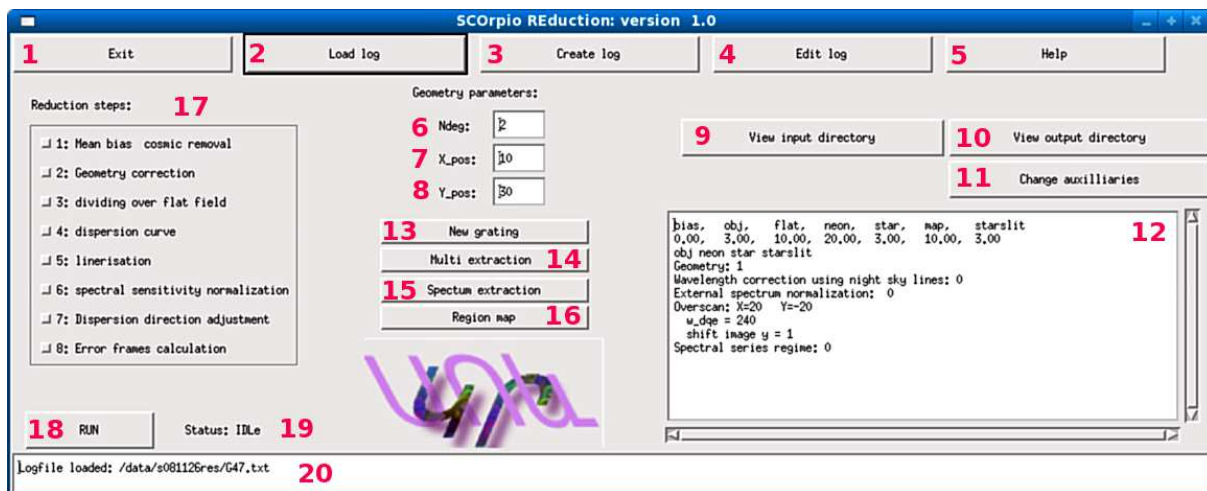


Рис. 1: Внешний вид основного окна пакета ScoRe. 1 – выход, 2 – загрузить готовый logfile, 3 – автоматическое создание logfile, 4 – просмотр (изменение) загруженного logfile, 5 – описание программы, 6, 7, 8 – параметры, относящиеся к исправлению геометрии, 9 – просмотр исходных данных, 10 – просмотр обработанных данных, 11 – изменение значений параметров обработки, 12 – список значений параметров обработки, 13 – определение новой дифракционной решетки, 14 –экстракция нескольких объектов, 15 – экстракция спектра, 16 – создание карты окрестности , 17 – основные этапы редукции, 18 – кнопка запуска, 19 – статус 20 – панель, на которой записано имя загруженного logfile

## 2.2 Характеристика различных типов данных, получаемых на SCORPIO

Прежде чем перейти к описанию программ, входящих в ScoRe, кратко охарактеризуем основные типы исходных данных.

- BIAS — кадр с нулевой экспозицией, постоянная добавка во всех видах накоплений ПЗС. Уровень шума на кадрах BIAS равен шуму считывания. Обычно при обработке усредняется 5-10 кадров BIAS. В электронном журнале наблюдений обозначается bias.
- FLAT — спектральное плоское поле. Используется для учета неоднородности чувствительности, дефектов и клиновидности щели, для удаления фрингов. Фринги — интерференционная картина, возникающая на тонких ПЗС в слое кремния и зависящая от многих параметров, в основном от длины волны падающего излучения. В электронном журнале наблюдений обозначается flat.
- NEON — калибровка шкалы длин волн. Производится с помощью лампы с полым катодом (ЛПК) с He-Ne-Ag наполнителем. В электронном журнале наблюдений обозначается neop.
- STAR MASK — звезда — спектрофотометрический стандарт, снятый в режиме “бесщелевой спектроскопии”. Наблюдения звезд — спектрофотометрических стандартов рекомендовано проводить в режиме “бесщелевой спектроскопии”. Для выделения спектра объекта в центре поля зрения используется круглая маска. Она обеспечивает невиньетированное поле зрения диаметром около 30". В электронном журнале наблюдений обозначается obj и в графе FILTERS ставится “mask”.
- STARSLIT — спектр звезды-стандарта, полученный на щели. В электронном журнале наблюдений обозначается obj и в графе FILTERS ставится “slit\_x”, где x — ширина щели в угловых секундах.

В большинстве случаев во время наблюдений снимаются спектры спектрофотометрических стандартов из списка Oke (1990), рекомендованного в описании к прибору SCORPIO (Афанасьев & Моисеев, 2008).

- ОБЪЕКТ — спектр объекта. В электронном журнале наблюдений обозначается obj.
- MAP — прямой снимок объекта, получаемый непосредственно перед спектроскопией и используемый для точного наведения на объект. В электронном журнале наблюдений обозначается obj, в графе MODE записывается “Image”.

## 3 Начало работы

В начале работы со ScoRe необходимо создать “logfile”. В данной работе мы “logfile” называем файл, содержащий всю основную информации об исходных данных и о директории, в которую будут сохраняться результаты обработки. “Logfile” должен иметь такой же формат, как и заголовок fits-файла. Образец “logfile” показан на рис. 2. “Logfile” можно создать автоматически при помощи опции “Create log” (кнопка под номером 3 на рис. 1)

Обработку данных в ScoRe можно разделить на два этапа. Первый этап это редукция двумерных изображений, второй — экстракция одномерного спектра.

### 3.1 Основной этап

На первом этапе обычно не требуется использования специальных настроек. Вся информация, необходимая для работы программы, берется из загруженного “logfile” и из заголовков fits-файлов. Поэтому пользователю достаточно загрузить нужный “logfile”, в меню (отмечено номером 17 на рис. 1) отметить нужные шаги обработки и нажать кнопку “RUN” (18 на рис. 1). Обработка разная для разных типов данных. Способ обработки также зависит от количества экспозиций. После каждого этапа редукции обработанные данные записываются в файлы. Первое слово в названии данного файла соответствует типу данных, а суффикс — этапу обработки. Например, запись starslit\_ic.fits значит, что тип данных STARSLIT, суффикс \_ic — файл записан после второго этапа обработки. При этом на каждом этапе обработки создаются проверочные файлы, по которым можно отследить правильность работы программы.

Первый этап состоит из семи последовательных шагов. Кратко перечислим их.

```

/data/V532/s080110/V532.txt
File
SIMPLE = T / LOG OBSERVATION
EXT = '.FITS' / EXTENSION DATA FILE
R_DIR = /data/V532/s080110/ /DIRECTORY FOR READING
W_DIR = /data/V532/s080110res/ /DIRECTORY FOR WRITING
YOBJ = '190,0,210,0' /RANGE REDUCTION ALONG Y
SLITSIZE= '1,0,1,0'
SLITPOS = 550 / POSITION SLIT ALONG X
NIGHT = S528 / NUMBER OBSERVING NIGHT
MAP = '0404' / NUMBER OBJECT MAP
OBJ = '0406,0407' / NUMBER OBJECT FILES
BIAS = '2001,2002,2003,2004,2005' / NUMBER BIAS FILES
DARK = ' ' / NUMBER DARK FILES
FLAT = '0408,0409' / NUMBER FLAT FILES
NEON = '0405' / NUMBER COMPARISON SPECTRUM FILES
STAR = '0208,0209' / NUMBER FILES STANDARD STAR
STARSLIT= '0205' / NUMBER FILES STANDARD STAR
TABLE = '/usr/local/SCORE_V11/standards/fbd25d4655.dat' /FILENAME MAG TABLE ST
REDSHIFT= '0,0' /System redshift
END

```

Рис. 2: Образец logfile. Ключевые слова: EXT – расширение исходных данных, обычно '.FITS'; R-DIR – директория, содержащая исходные данные ; W-DIR – директория, в которую будут сохраняться обработанные данные; YOBJ – начальный диапазон координат вдоль щели для экстракции спектра объекта ; SLITSIZE – ширина щели в угловых секундах; SLITPOS – положение щели в пикселях на прямом снимке объекта; NIGHT – номер наблюдательной ночи в формате SXXX где S – идентификация прибора, XXX - номер ночи (на SCORPIO принята сплошная нумерация ночей); MAP – номер(а) файла(ов), содержащего(их) изображение(я) объекта, в формате ZZYU где ZZ - номер “куба данных”, YU - номер изображения в “кубе”; OBJ – номер(а) файла(ов), содержащего(их) спектр(ы) объекта; BIAS – номер(а) файла(ов), содержащего(их) bias с тем же биннингом, что и объект ; FLAT – номер(а) файла(ов), содержащего(их) изображение(я) спектрального плоского поля.; NEON – номер(а) файла(ов), содержащего(их) спектр(ы) ЛПК; STAR – номер(а) файла(ов) с изображением(ями) звезды стандарта в маске; STARSLIT – номер(а) файла(ов) со спектром(ами) звезды-стандарта на щели; TABLE – файл, содержащий табличный спектр звезды-стандарта в dat формате ; REDSHIFT – предварительная оценка красного смещения, в основных этапах обработки не используется, но записывается в заголовок fits-файла; END

### 1 шаг – “Mean bias. Cosmic removal”

Выполняется распаковка архивов (.zip), находится средний BIAS. На всех изображениях обрезается overscan<sup>2</sup>. Если экспозиций объекта несколько и включен флаг “shift image y”, то методом кросскорреляции по Y-координате находится смещение отдельных снимков объекта относительно первого и все кадры соответственно смещаются. Удаляются следы космических частиц. Почищенные от следов космических частиц изображения суммируются и из них вычитается средний BIAS, умноженный на число экспозиций. Обработанные данные записываются в файлы с суффиксом \_i и расширением fts, для контроля чистки космических частиц создаются файлы с суффиксом \_mask и расширениями ps и fts.

Если имеется несколько экспозиций объекта и включен флаг “spectral series regime”, из почищенных изображений вычитается средний BIAS и создается трехмерный массив. Этот массив записывается в файл obj\_i3.fts.

Если число экспозиций больше 10 (режим “Multiframe”), то:

<sup>2</sup>overscan – несканируемая область, темная полоса на краю изображения, возникающая из-за разницы между физическим размером матрицы и размером файла. Для матрицы (E2V 42 40), установленной на SCORPIO, размер файлов 2068×1046, физический размер 2048×1026.

- каждое изображение сдвигается относительно суммы предыдущих изображений
- из каждого изображения вычитается средний BIAS
- каждое изображение чистится от следов космических частиц
- каждое обработанное изображение записывается в отдельный файл
- все почищенные изображения объекта складываются, суммарное изображение также сохраняется в отдельный файл

Кроме этого, в иллюстративных целях создается трехмерный файл (анимация) с расширением “.mpg”, в котором каждое обработанное изображение представляет собой отдельный кадр.

## 2 этап – “Geometry correction”

Если включен флаг “Geometry correction”, на втором этапе исправляется искривление изображения, возникающее из-за аберраций дифракционной решетки (процедура “geometry\_neon”). Для исправления используется спектр калибровочной лампы. Исправленные изображения записываются в файлы с суффиксом \_ic и расширением fts. Для контроля исправления геометрии создаются файлы с суффиксом \_warp и расширением ps.

Если флаг “Geometry correction” не включен, файлы с суффиксом \_i автоматически копируются в файлы с суффиксом \_ic, а файлы с суффиксом \_warp не создаются.

## 3 этап – “Dividing over flat field”

На третьем этапе все (obj, star, starslit) делятся на плоское поле. Изображения, деленные на flat, записываются в файлы без суффикса с расширением fts. В случае большого числа экспозиций создается файл obj.mpg

## 4 этап – “Dispersion curve”

Для построения дисперсионной кривой используется спектр калибровочной лампы с He-Ar-Ne наполнителем. При автоматическом построении кривой положение линий калибровочного спектра сравнивается с табличными данными<sup>3</sup>, таким образом определяется дифракционная решетка. Строится предварительная дисперсионная кривая. Затем эта дисперсионная кривая уточняется с помощью вписывания гауссиан в избранные линии. Дисперсионная кривая сохраняется в файл “2D\_coeff.fts”. Для контроля создается файл с дисперсионной кривой (neon\_poly.ps) и файл со спектром NEON (neon.ps).

Для некоторых данных (снятых на решетке, для которой еще нет таблицы, или при плохо закрепленной решетке) лучше создавать новую таблицу. Для этого написана специальная процедура “New grating” (13 на рис. 1). После запуска данной процедуры появляется окно со спектром NEON, в котором “в ручную” можно отождествить линии и, таким образом, создать новую таблицу.

## 5 этап – “Linerisation”

При линеаризации спектра используется дисперсионная кривая, построенная по спектру NEON. Линеаризованные изображения записываются в файл с суффиксом \_lin и расширением fts. Если включен флаг “Wavelength correction using night sky lines”, при линеаризации используются линии неба (для гризм VPHG550G и VPHG1200G [OI]  $\lambda$ 5577, для VPHG1200R [OI]  $\lambda$ 6300). С помощью процедуры BARYVEL по юлианской дате определяется барицентрическая скорость, которая записывается в заголовок FITS-файла. Двухмерные спектры объекта и звезды – стандарта (полученные и в маске, и на щели) приводятся к барицентру.

## 6 этап – “Spectral sensitivity normalization”

Нормировка спектра на спектральную чувствительность. По экстрагированному спектру звезды-стандарта строится кривая. Кривая DQE записывается в отдельный файл ‘sent.fts’. Используя

<sup>3</sup>Для всех гризм, используемых на SCORPIO, существуют эталоны спектров стандартов длин волн. Т.е. для каждой решетки имеется таблица, в которой приведены длины волн (в воздухе) наиболее ярких линий и значения интенсивности этих линий.

данную кривую DQE осуществляется переход к нормированному спектру (переход от числа отсчетов в пикселе к эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-2</sup>). Нормированные спектры записываются в файлы с суффиксом `_norm` и расширением `fts`.

Если включен флаг “External spectral sensitivity calibration” для нормировки на спектральную чувствительность можно использовать файл, содержащий кривую спектральной чувствительности, посчитанную независимо. Поясним, что это удобно в том случае, если у Вас в течение одной ночи получены спектры нескольких объектов на одной гризме. Посчитав `'sent.fts'` при обработке одного из объектов, можно сократить время обработки других объектов и сэкономить место на жестком диске, включив данный ключ. При этом изображения STAR и STARSLIT вообще не будут обрабатываться. Иногда во время наблюдений забывают или не успевают снять спектр звезды стандарта или снятый спектр плохого качества. Поэтому при обработке приходится использовать спектр звезды стандарта, снятый в другую ночь. В этом случае тоже стоит использовать ключ “External spectral sensitivity calibration”.

## 7 этап – Dispersion correction adjustment

Данный этап предназначен для коррекции атмосферной дисперсии. В случае если атмосферная дисперсия направлена вдоль щели, положение объект на матрице смещается вдоль щели в зависимости от длины волны. Процедура “LS\_correlate” кросс-коррелирует монохроматические изображения вдоль щели. Исправленное изображение записывается в файл `obj_norm_1.fts`. Стоит использовать данную процедуру и в случае плохо закрепленной гризмы.

## 3.2 Экстракция спектра

В ScoRe предусмотрено несколько видов экстракции спектра.

При нажатии кнопки “Spectrum extraction” (15 на рис. 1) появляется новое окно (рис. 3). В данном окне с помощью слайдеров можно указать положение объекта и область для построения фона.

С помощью кнопки с начальным значением “Aperture” можно выбрать способ экстракции.

- “Aperture” – Экстракция апертурой
- “Gauss” – Экстракция одной гауссианой
- “MultiGauss” – Экстракция двумя гауссианами. Эффективно работает при экстракции близко расположенных объектов (расстояние между объектами меньше 7”).

Для экстракции спектров нескольких близко расположенных объектов предназначена процедура “Multi extraction”. При нажатии кнопки “Multi extraction” (14 на рис. 1) появляется окно (см рис. 4).

Участки, по которым будет строиться фон, можно выбрать с помощью слайдеров, которые появляются при нажатии кнопки “select background”. Кроме этого, фон можно построить автоматически, для этого достаточно нажать кнопку “Smooth background” или “Low background”. При этом сначала определяется положение  $n$  самых ярких звезд<sup>4</sup>, отсортированных по яркости. Фон строится для каждой длины волны с использованием сглаживающего сплайна, либо скользящего среднего. Выбор между двумя алгоритмами осуществляется при помощи кнопок “Low background” и “Smooth background”. Области вокруг ярких звезд (расстояние до ближайшей звезды  $\leq 20''$  при “Low background” и  $\leq 6''$  при “Smooth background”) не используются при проведении фона. Значения фона интерполируются на весь рассматриваемый диапазон по  $Y$ .

Вы можете добавить нужное количество гауссиан. При нажатии на кнопку “Add gaussian” появляется новая гауссиана, начальные параметры которой можно менять с помощью слайдеров. Используя кнопки “Change gaussian” и “Remove gaussian” можно соответственно менять параметры уже имеющихся и удалять гауссианы.

## 3.3 Дополнительные функции

### Расчет ошибок

Хотя пункт “Error frames calculation” входит в основное меню (номер 17 на рис. 1), запускать данный этап стоит последним, после выполнения семи, описанных выше, этапов обработки и после экстракции спектра. Поэтому мы рассмотрим его как дополнительную функцию.

---

<sup>4</sup> $n$  обозначено как “Number stars” и задается в этом же окне, по умолчанию равно 6.

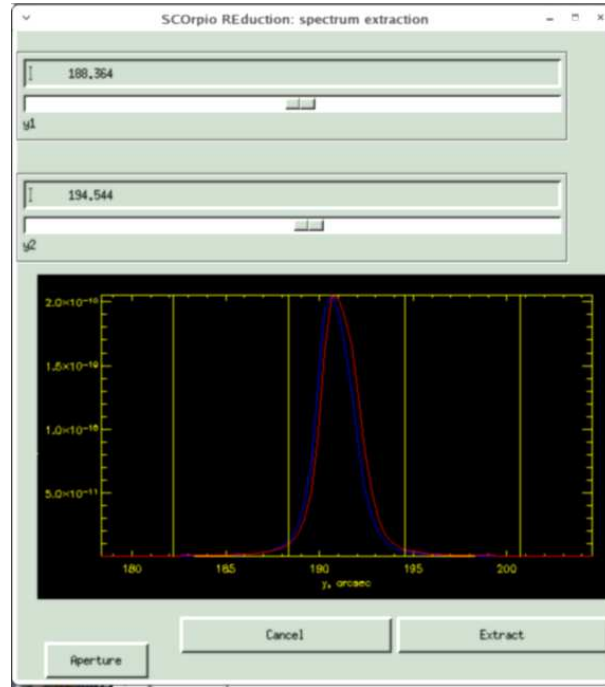


Рис. 3: Окно “Spectrum extraction”. Красным показан суммарный (по длине волны) профиль вдоль щели в красной части спектра, синим – профиль вдоль щели в синей части спектра, вертикальные линии (внутренние) соответствуют положению слайдеров, по отрезкам между внутренними и внешними линиями будет строиться фон.

В основу оценки погрешностей везде положен статистический подход. Считается, что дисперсия количества электронов в данном элементе разрешения приемника (ПЗС-матрица EEV 42-40 с низким шумом считывания) равна математическому ожиданию их количества, что соответствует пуассоновской статистике. Такое предположение используется при удалении следов космических частиц, а также при оценке погрешностей потока. Файлы ошибок (errorframes) рассчитываются в стандартных предположениях переноса погрешностей. Сначала с помощью процедуры “errorframe\_long” создается файл ошибок dsp.fts. Затем, с помощью процедуры “signal\_noise\_score” рассчитывается значение ошибки на элемент разрешения, создается файл noise.fts, определяется отношение сигнал/шум (отношение obj\_spect.fts к noise.fts) и записывается в файл signal.fts.

#### Создание карты окрестностей

При обработке данных иногда возникает необходимость посмотреть как во время наблюдений была ориентирована щель спектрографа. Поэтому мы дополнили наш пакет процедурой “Region map” (16 на рис.1). Позиционный угол  $PA_{slit}$  рассчитывается по формуле  $PA_{slit} = P2 - P_{table} + 132.5$  еще на первом этапе обработки данных и записывается в заголовок fts-файла как “POSANG”. В заголовке исходного fts-файла записаны только  $P2$  как ‘PARANGLE’ и  $P_{table}$  – ‘ROTANGLE’. Отметим, что позиционный угол на кадре будет соответствовать экспозиции MAP (которая используется при построении карты), а положение щели указывается в соответствии с ключом “SLITPOS” в logfile.

#### 4 “Spectral series regime”

В данной статье мы уже несколько раз упоминали, что в ScoRe предусмотрен специальный режим (“Multiframe”) для обработки большого количества коротких экспозиций. Расскажем о нем подробнее на примере исследования быстрой спектральной переменности объекта MWC560.

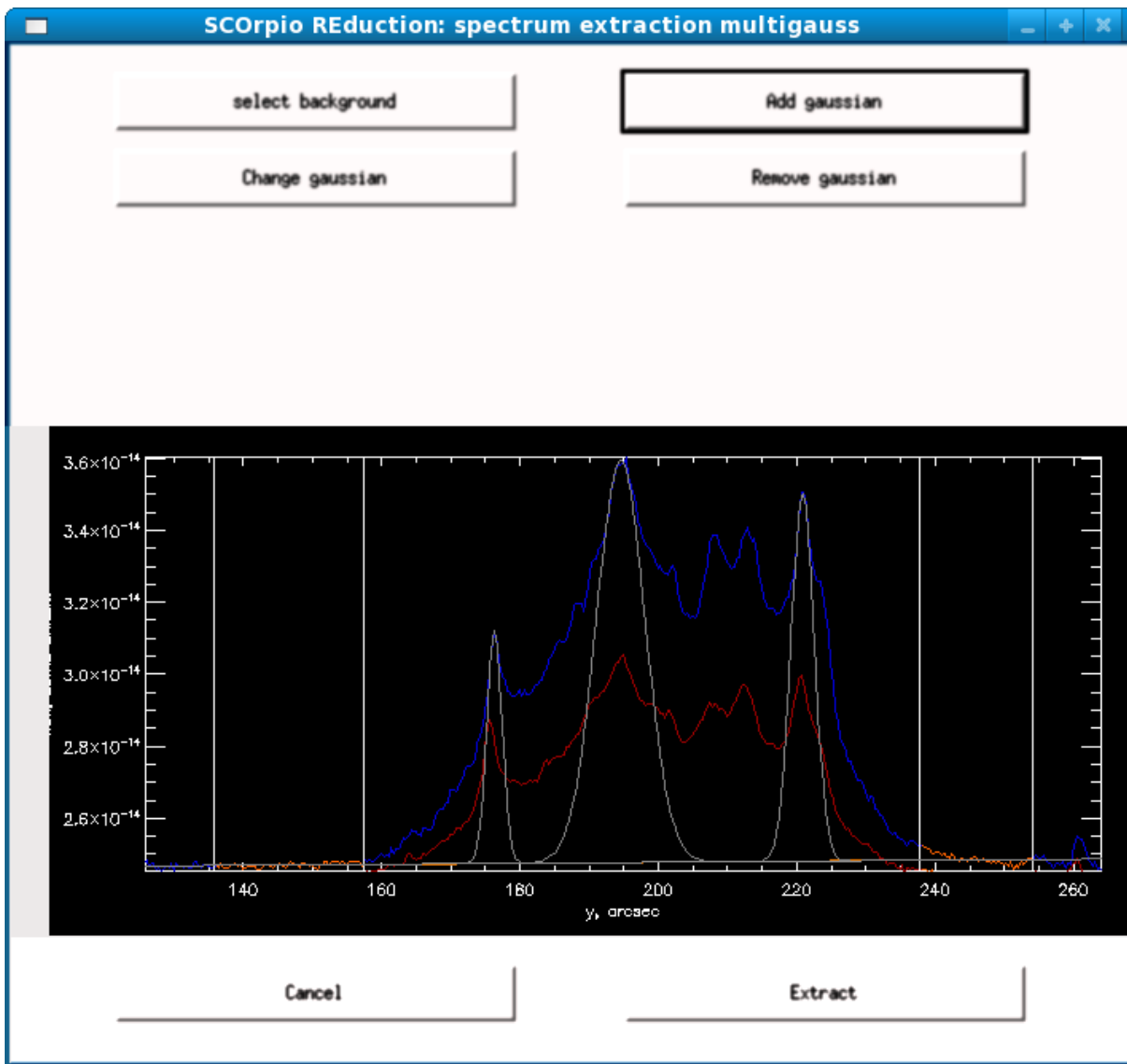


Рис. 4: окно Multi extraction



## 4.1 Переменный объект MWC560

## 4.2 Наблюдения

30 декабря 2006 года в течение 3 часов на БТА было получено 244 экспозиции. Продолжительность каждой экспозиции 30 секунд. Калибровочные спектры NEON снимались через каждые 50 экспозиций. Для проверки на спектральную чувствительность был получен спектр звезды стандарта Hilt600 !!!!!!!!!!!!!!!.

## 4.3 Обработка

Обработка состояла из тех же этапов, что и при традиционных наблюдениях. Только, одновременно обрабатывались и суммарное изображение объекта (сумма 240 изображений), и отдельные изображения. На каждом этапе для визуализации создавались файлы с расширением .mpg, в которых каждый слайд это отдельное изображение.

Экстракция спектра. Сначала мы экстрагировали суммарный спектр с помощью процедуры "Spectrum extraction". Как было написано выше, в окне рис. 3 выбрали участки для экстракции объекта и фона. После нажатия кнопки "Extract" значения положения слайдеров сохраняются в специальный файл intspec\_file.txt. В случае если экспозиций больше 10, то после экстракции суммарного спектра начинается экстракция отдельных спектров. При этом от пользователя уже не требуется каждый раз указывать область объекта. Она считывается из созданного файла intspec\_file.txt. Кроме отдельных спектров, которые записываются в файлы obj\_spectX.fts (X – номер экспозиции), данная процедура создает еще и файлы obj\_multispect.fts и obj\_multispect\_norm.fts. obj\_multispect.fts – трехмерный файл, в котором собраны все одномерные спектры и смещены по времени. В obj\_multispect\_norm.fts – собраны нормированные спектры.

## Список литературы

Afanasiev V. L., Moiseev A. V., 2005, Astronomy Letters, 31, 194

Oke J.V. 1990, ApJ, 99, 1621

Афанасьев В. Л., Моисеев А.В. Универсальный редуктор светосилы SCORPIO: Руководство пользователя, САО, 2008