

УДК 520.36:520.844-17

## ОБРАБОТКА ПЗС-НАБЛЮДЕНИЙ СО СКАНИРУЮЩИМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ ФАБРИ-ПЕРО. II. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ

© 2008 А. В. Моисеев<sup>1</sup>, О. В. Егоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, Москва, 119992 Россия

Поступила в редакцию 12 ноября 2007 г.; принята в печать 20 ноября 2007 г.

Описывается пакет программ, используемых в CAO РАН для обработки и анализа данных, получаемых со сканирующим интерферометром Фабри-Перо. Большинство применяемых алгоритмов были уже приведены ранее в статье [1]. В данной работе основное внимание уделяется дополнительным процедурам, необходимым в случае применения сканирующего ИФП высокого спектрального разрешения: удалению паразитных бликов и измерению дисперсии скоростей ионизованного газа в галактических и внегалактических объектах.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сканирующий интерферометр Фабри-Перо (ИФП) позволяет детально изучать структуру и кинематику галактик, туманностей и других протяженных объектов. Идея этого метода наблюдений достаточно подробно изложена в статьях [1, 2], там же приведены ссылки на более ранние работы. Результатом наблюдений является набор двумерных интерферограмм, представляющих собой свертку монохроматического изображения объекта с кривой пропускания ИФП на данном шаге сканирования. После специальной обработки (коррекции за фазовый сдвиг) из них можно собрать “куб данных”. В таком кубе каждому пространственному элементу в плоскости детектора сопоставляется индивидуальный спектр. Спектральный диапазон обычно невелик и составляет всего 5–50 АА, что позволяет изучать, к примеру, кинематику ионизованного газа по одной-двум эмиссионным линиям.

Для обработки данных наблюдений с ИФП требуется соответствующее программное обеспечение, заметно отличающееся от используемого при анализе данных, получаемых со щелевыми спектрографами. В работе [1] представлен краткий обзор распространенных систем обработки таких данных. Из появившихся в литературе свежих работ на эту тему следует отметить статью [3], в которой предложен ряд новых процедур: адаптированное пространственное бинирование кубов перед построением полей скоростей, алгоритмы поиска эмиссионных линий и вычитания линий ночного неба.

В CAO РАН сканирующий ИФП является составной частью многорежимного редуктора светосилы SCORPIO [4] с ПЗС-матрицей в качестве детектора. В отличие от двумерных счетчиков фотонов, которые в последнее время стали вновь использоваться в комбинации с ИФП (см. [5]), использование более “медленных” ПЗС требует иных алгоритмов обработки получаемых данных. Прежде всего это касается проблемы поканальной фотометрической коррекции и вычитания спектра ночного неба. Подробно этот вопрос рассматривался в работе [1], где приводятся основные алгоритмы, на которых основано программное обеспечение, используемое для обработки наблюдений со SCORPIO в режиме сканирующего ИФП.

Согласно базе данных ASPID<sup>1</sup>), за 2000–2007 гг. на 6-м телескопе CAO РАН в рамках двух десятков наблюдательных программ было получено около 180 кубов данных ИФП, которые уже послужили основой для более 30-ти публикаций. Опыт обработки этого наблюдательного материала позволил усовершенствовать наш пакет программ и разработать ряд новых полезных процедур анализа данных. Их описанию и посвящается данная работа. В разделе 2 рассматривается проблема борьбы с бликами, возникающими в ИФП высокого разрешения. Задаче наилучшей аппроксимации профилей эмиссионных линий с целью определения дисперсии скоростей ионизованного газа посвящен раздел 3. Далее, в разделе 4, кратко описывается пакет программ,

<sup>1</sup><http://alcor.sao.ru/db/aspid/>.

используемый сейчас для обработки наблюдений на 6-м телескопе со сканирующим ИФП в составе прибора SCORPIO.

## 2. ВЫЧИТАНИЕ БЛИКОВ

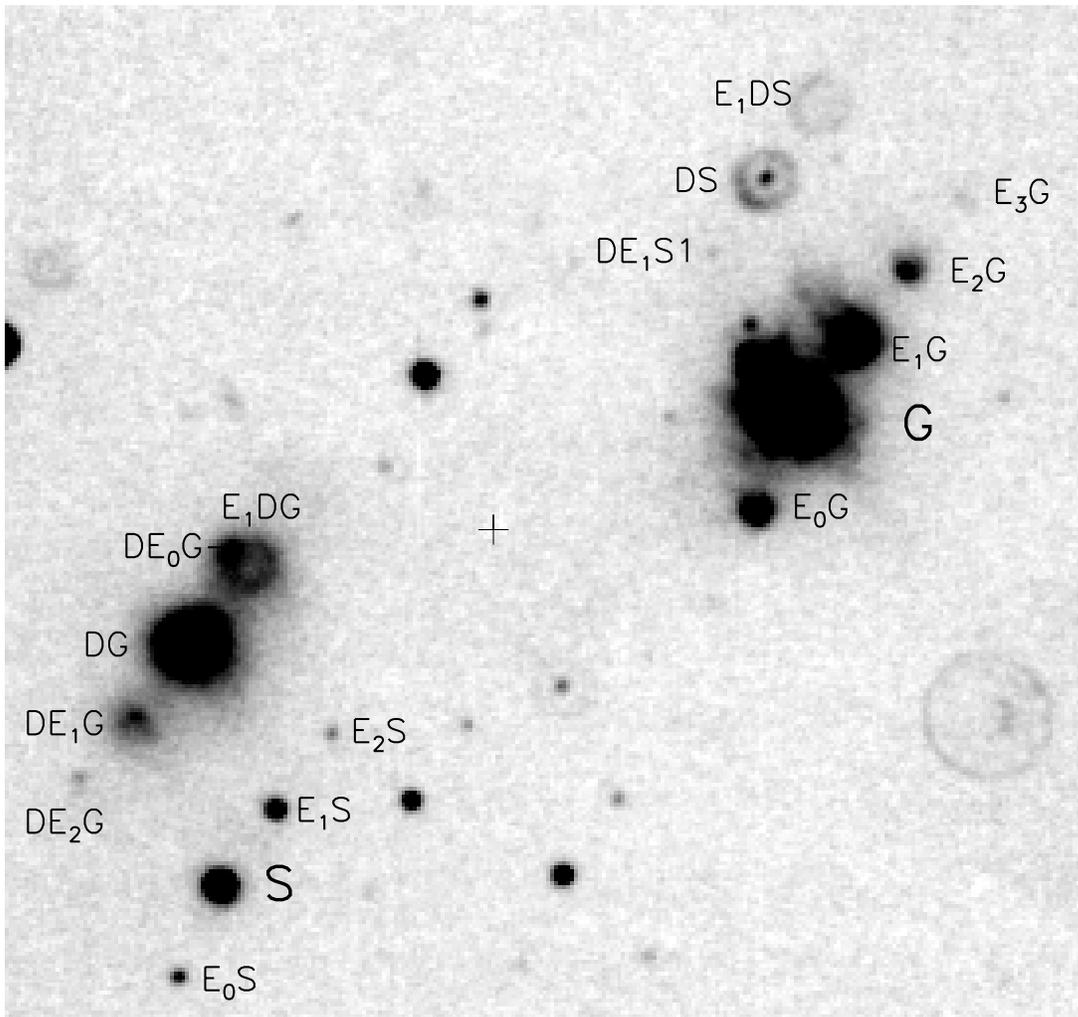
Сейчас SCORPIO укомплектован двумя сканирующими интерферометрами (далее IFR235 и IFR501) с зазором между пластинами, соответствующим 235 и 501 порядкам интерференции на длине волны  $\lambda 6562.8\text{\AA}$ . Подробные характеристики обоих интерферометров приводятся в статье [1]. Установка ИФП в выходном зрачке системы, между коллиматором и камерой фокального редуктора, приводит к появлению на изображении паразитных бликов. Блики возникают в результате переотражения света внутри пластин интерферометра и между ними и ближайшими линзами фокального редуктора, поверхностями узкополосного фильтра и т. д. Эта проблема хорошо известна, различные “семейства” бликов описаны в работе [6], а несколько более подробное описание дается в статье [7]. Ввод в пучок IFR235 порождает блики так, что основное изображение и эти блики располагаются симметрично относительно оптической оси ИФП. Интенсивность таких бликов (будем называть их, согласно классификации из работ [6, 7], “диаметральными бликами”, “D”) составляет около 10% от интенсивности основного изображения. Обычно в таких случаях рекомендуется наклонить ИФП к оптической оси системы, чтобы сместить блик за пределы поля детектора. Однако из-за конструктивных особенностей SCORPIO такой вариант невозможен. Поэтому в процессе наблюдений необходимо располагать изображение объекта в стороне от оптической оси, а также следить за тем, чтобы на него не накладывались блики от звезд поля. Из-за этого в большинстве случаев полезное поле зрения SCORPIO уменьшается вдвое.

При наблюдениях с IFR501 возникает еще одно семейство бликов — “экспоненциальное” (“E”, согласно терминологии из [6, 7]). Эти блики образуются в результате переотражений внутри пластин ИФП и создают более серьезную проблему, чем диаметральные, поскольку ближайший из них появляется на расстоянии всего  $16''$  от изображения объекта и имеет значительную интенсивность (около 12% от яркости объекта). Столь интенсивные блики являются следствием деградации просветляющего (антирефлексного) покрытия внешних поверхностей пластин IFR501. К сожалению, стоимость замены пластин (или перенапыление покрытий) в данном случае близка к стоимости сборки нового ИФП, которая весьма велика. И все же до приобретения нового интерферометра

имелся соблазн использовать IFR501, поскольку в остальном он обладает хорошими характеристиками, прежде всего относительно высоким (для внегалактической астрономии) спектральным разрешением  $R \approx 8300$  в линии  $H_\alpha$ . Такой прибор оказался востребованным на 6-м телескопе для наблюдений, выполнение которых с IFR235 невозможно из-за того, что он обеспечивает более низкое спектральное разрешение. Прежде всего это наблюдения туманностей с относительно небольшим (в пределах 100–200 км/с) разбросом лучевых скоростей: объектов Херbiga-Aro, областей звездообразования в нашей и других галактиках и т. п.

В ряде случаев следы от бликов можно удалить на этапе обработки данных, применяя соответствующие алгоритмы. Рис. 1 (идея которого почерпнута нами из [6, 7]) наглядно иллюстрирует сложную систему возникающих бликов. Именно, изображение галактики (G) порождает близкие блики  $E_0G$  и  $E_1G$ , яркость которых составляет 4% и 12% от яркости объекта. Далее  $E_1G$  порождает  $E_2G$ , а тот —  $E_3G$ , яркость которых составляет 1.4% и 0.15% от яркости G, т. е. уменьшается в геометрической прогрессии, как и должно быть при многократных переотражениях. Эти блики возникают на передней пластине ИФП, до того, как свет пройдет через интерферометр, поэтому они являются монохроматическими — их относительная интенсивность в кубе данных не меняется с длиной волны  $\lambda$ . В то же время блик  $E_0G$  возникает на задней пластине ИФП уже после того, как произошла интерференция. На интерферограмме изображение этого блика попадает в область, соответствующую другим длинам волн. Таким образом, в кубе данных будет наблюдаться сдвиг по  $\lambda$  между спектрами G и  $E_0G$ , величина которого зависит от положения изображения на детекторе.

На рис. 1 также отмечены диаметральные блики, то есть расположенные симметрично относительно оптической оси интерферометра. Изображение галактики G и соответствующий ему блик DG расположены симметрично относительно оптической оси, блик  $E_1G$  порождает вторичный диаметральные блики  $DE_1G$ , а  $E_2G$  — соответственно —  $DE_2G$  и т.д. Блики DG также порождает семейство вторичных экспоненциальных бликов, на рисунке заметен  $E_1DG$ . Последний переналагается с диаметральным бликом  $DE_0G$ . Структура диаметральные блики довольно сложна, что хорошо заметно на примере блика от яркой звезды фона — DS. Именно, этот блик состоит из двух изображений звезды — нормального (интенсивностью  $\sim 5\%$  от интенсивности звезды S) и сильно расфокусированного, так что изображение звезды превращается в кольцо, суммарная интенсивность



**Рис. 1.** Примеры бликов в интерферометре IFP501. Наблюдения 30/31.I. 2007 в линии  $H\alpha$  по заявке С. Мифоз-Тийоп. Галактика II Zw 70 обозначена как “G”, яркая звезда фона — как “S”. Показана сумма всех каналов в кубе данных. Диаметральные и экспоненциальные блики обозначены как “D” и “E” соответственно. Крестиком отмечен центр поля зрения.

которого составляет около 10% от интенсивности S.

Заметим, что далеко не всегда удается обнаружить такое большое количество ложных изображений, как на рис. 1. Здесь показан предельный случай наблюдения относительно яркого эмиссионного объекта, чаще удается заметить только самые яркие блики (DG,  $E_0G$  и  $E_1G$ ). Мы столь подробно останавливаемся на картине возникающих бликов, поскольку считаем, что это поможет пользователям прибора ориентироваться в полученных данных и отличать реальные эмиссионные детали от бликов.

Если идеальный (без бликов) куб данных обозначить как  $I_{real}$ , то приведенный в шкалу длин волн наблюдаемый куб выглядит как

$$I_{obs}(x, y, \lambda) = I_{real}(x, y, \lambda) + I_{ghost}(x, y, \lambda), \quad (1)$$

где семейство экспоненциальных бликов можно представить в виде:

$$I_{ghost}(x, y, \lambda) \approx f_0 \hat{P} I_{real}^{-1}(x - \Delta x_0, y - \Delta y_0, z) + \sum_{i=1}^{i_{max}} f_i I_{real}(x - \Delta x_i, y - \Delta y_i, \lambda). \quad (2)$$

Относительная яркость бликов  $f_i$  убывает в геометрической прогрессии с ростом числа отражений  $i$ , поэтому суммирование ведется не до бесконечности, а до  $i_{max} = 3 - 5$ , вклад бликов более высоких порядков обычно незначителен. По этой же причине не учитывается вклад вторичных бликов, таких как монохроматические спутники бликов монохроматического семейства. Первое слагаемое во (2) описывает блик  $E_0G$ , смещенный по шкале длин волн. Здесь  $\hat{P}$  обозначает операцию “фазовой

коррекции”, т. е. переход от спектров в шкале номеров каналов ИФП  $z$  к шкале длин волн:

$$I(x, y, \lambda) = \hat{P}I(x, y, z) = I(x, y, k(z + p(x, y))),$$

где  $p(x, y)$  — так называемая фазовая карта (подробнее смотри раздел 2 в работе [1]), а  $k(z) = k_1 z + k_0$  — линейная функция, коэффициенты которой определяются тем, какой конкретно сканирующий ИФП используется. Соответственно,  $I_{real}^{-1}$  — есть результат обратного перехода от шкалы длин волн к каналам интерферометра:

$$I_{real}^{-1}(x, y, z) = \hat{P}^{-1}I_{real}(x, y, \lambda).$$

Нашей задачей является получение из  $I_{obs}$  наилучшего приближения к очищенному от бликов кубу  $I_{real}$ . Для этого мы используем следующую итерационную процедуру. Подставляя в выражение (2)  $I_{obs}$  вместо  $I_{real}$ , получаем первое приближение для модели бликов —  $I_{ghost}^1(I_{real})$ . Тогда, согласно (1), первое приближение для очищенного куба:  $I_{real}^1 = I_{obs} - I_{ghost}^1$ . Подставляя  $I_{real}^1$  в выражение (2), получаем следующее приближение к модели блика  $I_{ghost}^2$  и так далее, до  $I_{ghost}^n$ . Поскольку относительная яркость бликов невелика ( $f_i \ll 1$ ), то требуется всего несколько ( $n = 3 - 4$ ) итераций, чтобы построить модель блика, близкую к реальной.

Для семейства монохроматических бликов ( $i \geq 1$ ) выполняются соотношения:

$$\Delta x_i = i\Delta x_1, \Delta y_i = i\Delta y_1, f_i = f^i,$$

поэтому модель (2) имеет всего шесть свободных параметров, которые подбираются так, чтобы минимизировать отклонения между  $I_{ghost}^n$  и  $I_{obs}$ . Средние значения этих параметров приведены в таблице, они мало меняются от ночи к ночи.

Параметры модели бликов в линии  $H\alpha$

	$i = 0$	$i=1$
$f_i$	0.038	0.11
$\Delta x_i, ''$	-7.67	9.80
$\Delta y_i, ''$	-16.42	13.63

Наш опыт обработки наблюдательных данных, полученных с помощью IPR501, показал, что построенная по вышеописанной схеме модель, как правило, хорошо описывает реальные блики, без заметной систематики. Исключение составляют только данные, полученные при нестабильных атмосферных условиях, когда приходилось прибегать к сглаживанию отсчетов в отдельных каналах

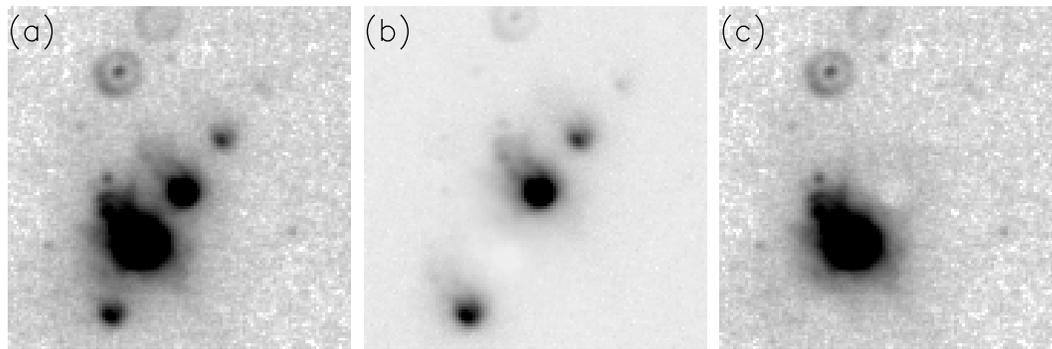
с целью компенсации значительных (более 10–20%) вариаций FWHM-изображений звезд (см. описание фотометрической коррекции в статье [1]).

На рис. 2 показано вычитание бликов вокруг изображения карликовой галактики II Zw 70. Другие примеры данных наблюдений, подвергнутых вышеописанной процедуре очистки от бликов, можно найти, например, в работах [8, 9] (изучение областей звездообразования в карликовых галактиках IC1613 и VII Zw403), [10] (кинематика ионизованного газа в голубых компактных галактиках), [11] (исследование истечений из молодых звездных объектов в области HL/НХ Tau).

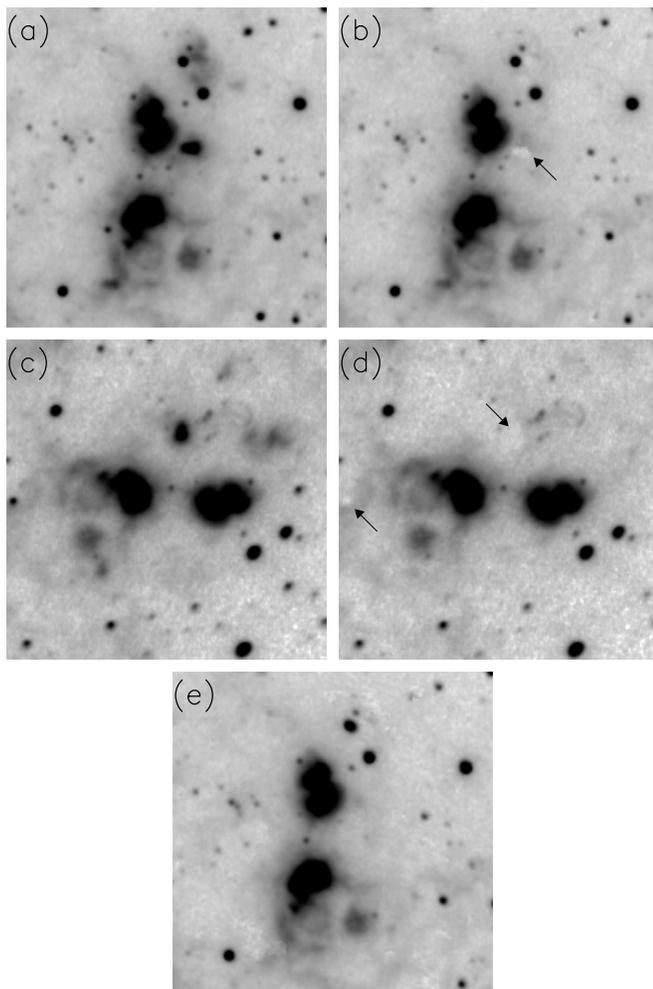
Еще одна проблема возникает при наблюдениях объектов с очень большим градиентом поверхностной яркости, когда интенсивный блик от компактной детали, например от ядра галактики, проецируется на значительно менее яркие области. Уровень пуассоновских шумов определяется суммарной интенсивностью блика и подложки. Поэтому после вычитания модели блика возможна ситуация, когда полезный сигнал в этой области будет сравним с амплитудой шумов, обусловленных статистикой фотонов. Чтобы избежать потерь спектральной информации от областей низкой яркости при наблюдениях таких объектов, мы рекомендуем разделить планируемую экспозицию пополам и выполнять наблюдения последовательно при двух различных ориентациях поля зрения прибора, развернутых по позиционному углу примерно на  $90^\circ$ . Блики в полученных двух кубах данных будут проецироваться на разные области объекта. После первичной обработки из каждого куба вычитается своя модель бликов и маскируются области, где после удаление бликов резко уменьшилось отношение сигнал/шум. Затем кубы объединяются в один, причем спектры из замаскированных областей в каждом кубе заменяются “хорошими” спектрами из другого набора данных. Одним из лучших примеров применения вышеописанного алгоритма является обработка наблюдений близкой карликовой галактики IC 10, представленная в работе [12] (изображение эмиссионных оболочек ионизованного газа занимает более половины поля зрения SCORPIO). Рис. 3 иллюстрирует последовательность действий при вычитании бликов из изображений этой галактики.

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ ДИСПЕРСИИ СКОРОСТЕЙ

Ряд программ, выполняемых с ИФП (например построение карт дисперсии скоростей ионизованного газа в галактиках), требуют точных оценок полуширин эмиссионных линий. При этом необходимо учитывать уширение, вносимое аппаратным профилем прибора. Традиционно используется следующее соотношение (подразумевается, что



**Рис. 2.** Вычитание бликов, показана сумма всех каналов куба данных для галактики II Zw 70. (a) Исходное изображение, (b) модель распределения яркости в бликах, (c) результат вычитания модели из исходного куба.



**Рис. 3.** Сумма каналов в кубах данных для галактики IC 10, наблюдения 8/9.IX.2005 в линии H $\alpha$  по заявке Т. А. Лозинской, показан фрагмент размером 72''  $\times$  72''. (a) Исходное изображение в первом кубе, (b) после вычитания бликов, стрелка указывает на области с неудовлетворительным качеством вычитания, (c) изображение в кубе, полученное после поворота поля зрения на 90°, (d) вычитание бликов из второго куба (стрелки указывают на некачественные области), (e) сумма обоих кубов данных.

и аппаратный профиль спектрографа и исходный — до аппаратного уширения — профиль линии описываются функциями Гаусса с дисперсиями  $\sigma_{real}$  и  $\sigma_{ins}$  соответственно):

$$\sigma_{obs} = \sqrt{\sigma_{real}^2 + \sigma_{ins}^2}. \quad (3)$$

Здесь  $\sigma_{obs}$  обозначает дисперсию гауссианы, с помощью которой описывается профиль линии, наблюдаемой на выходе прибора. Говоря в дальнейшем о проблеме измерения дисперсии скоростей, мы будем иметь в виду проблему оценки  $\sigma_{real}$  по наблюдаемым спектрам. При этом необходимо помнить, что уширение линий в спектре наблюдаемого объекта может вызываться не только дисперсией скоростей  $\sigma_{gas}$  (мера хаотических движений вдоль луча зрения), но и рядом других факторов. Так, для интегрального спектра НII-областей можно записать, согласно работе [13]:

$$\sigma_{real}^2 = \sigma_{gas}^2 + \sigma_N^2 + \sigma_{tr}^2, \quad (4)$$

где  $\sigma_N^2 \approx 3$  км/с и  $\sigma_{tr}^2 \approx 9.1$  км/с соответствуют естественной ширине эмиссионной линии и ее тепловому уширению при температуре  $10^4$  К.

Благодаря простоте и наглядности соотношение (3) широко используется в анализе спектральных данных, часто его обобщают, заменяя  $\sigma$  на FWHM. Но при этом следует понимать, что строгое равенство в (3) выполняется только для функций Гаусса, поскольку результатом свертки двух гауссиан является тоже гауссиана. Для щелевого спектрографа предположение о гауссовской форме инструментального профиля, как правило, верно. Однако аппаратный профиль ИФП, задаваемый функцией Эри, обладает широкими крыльями, и его лучшей аппроксимацией является не гауссиана, а профиль Лоренца (см., к примеру, [1, 6]). Поэтому, если исходный профиль эмиссионной линии является

гауссовским с дисперсией, определяемой соотношением (4), то наблюдаемый профиль является сверткой профилей Гаусса и Лоренца, т. е. задается функцией Фойгта (Voigt):

$$V(\lambda, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{real}} \frac{y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-x^2} dx}{y^2 + (a-x)^2}, \quad (5)$$

где

$$a = \frac{\lambda - \lambda_0}{\sqrt{2}\sigma_{real}}, \quad y = \frac{w_{ins}}{\sqrt{2}\sigma_{real}}.$$

Здесь  $\lambda_0$  — центральная длина волны, а через  $w_{ins}$  обозначена полуширина аппаратного (Лоренцевского) профиля ИФП, определяемая по спектру линий калибровочной лампы. Аппроксимируя наблюдаемый профиль функцией (5), получаем требуемую оценку  $\sigma_{real}$ . На рис. 4 видно, что профиль Фойгта значительно лучше гауссианы описывает крылья линий для спектров галактик, наблюдаемых с помощью IFR501. Из общих соображений ясно, что для оценки дисперсии скоростей использовать соотношение (3) менее корректно, чем выражение (5). В первом случае приходится использовать гауссовскую аппроксимацию для профилей линий, систематически отличающихся от этого приближения (рис. 4а), что может внести ошибку в оценку  $\sigma_{real}$ . Однако этот подход к измерению дисперсии скоростей во внегалактических НП-областях весьма популярен (см., к примеру, работы [10, 13, 14]). Представляется, что популярность этого метода вызвана не только тем, что формула (3) внешне выглядит проще, чем (5), но также и тем, что возможность гаусс-аппроксимации профилей спектральных линий предусмотрена практически во всех пакетах обработки астрономических данных. Применение профиля Фойгта для анализа внегалактических спектров менее распространено (см., к примеру, [15]), несмотря на то, что при современном развитии вычислительных средств расчет интеграла в (5) труда не представляет.

Мы оценили ошибки измерения кинематических параметров (лучевой скорости и дисперсии скоростей) в обоих вышеописанных подходах. Аппаратный профиль ИФП сглаживался гауссианой с дисперсией  $\sigma_{in}$ , в результирующий спектр добавлялись шумы и дисперсия скоростей оценивалась обоими методами. Разница между полученными значениями ( $\sigma_{out}$ ) и исходными ( $\sigma_{in}$ ) позволяет оценить ошибку измерения дисперсии скоростей  $\sigma_{err}$ . Для каждого фиксированного отношения сигнал-шум ( $S/N$ ) было получено по 1000 независимых измерений. Аналогично оценивалась ошибка измерения лучевой скорости. Расчеты проводились для аппаратных контуров с шириной

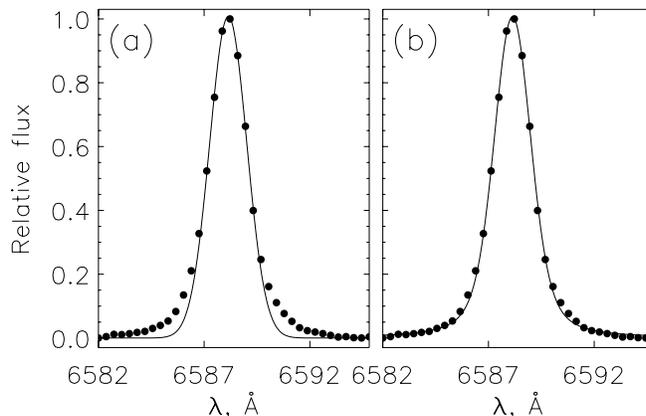
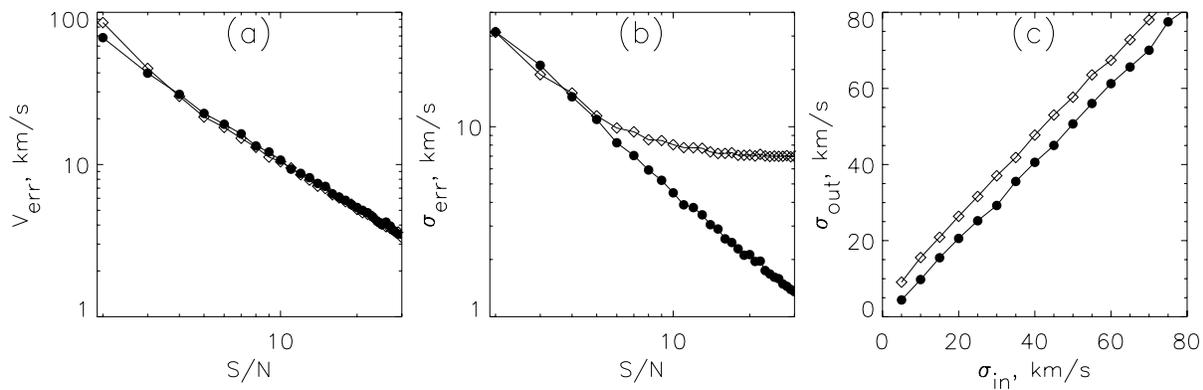


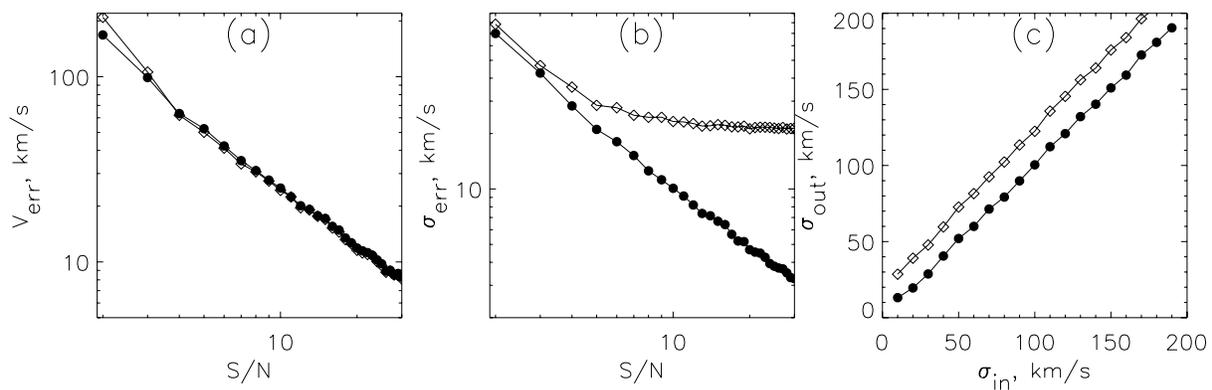
Рис. 4. Пример профиля спектральной линии  $H\alpha$  в галактике II Zw 70 по наблюдениям с IFR501 (точки). Линией показана аппроксимация функцией Гаусса (а) и профилем Фойгта (б).

вблизи линии  $H\alpha$   $w_{ins} = 35$  км/с (для IFR501) и  $w_{ins} = 115$  км/с (для IFR235). Результаты расчетов — зависимости ошибки измерения лучевых скоростей и дисперсии скоростей от уровня сигнала — показаны на рис. 5аb и 6аb. Как и ожидалось, в случае симметричных линий ошибка измерения лучевой скорости не зависит от алгоритма измерения. На уровне сигнала  $S/N = 30$  она составляет 2.5 и 8 км/с для интерферометров IFR501 и IFR235 соответственно.

С ошибкой измерения дисперсии скоростей ситуация иная. Как и ожидалось, ошибка измерений, основанных на аппроксимации профилем Фойгта, плавно уменьшается с ростом уровня сигнала и составляет всего несколько км/с для  $S/N > 20$ . Это ошибки, обусловленные шумом в измеряемых спектрах, систематическая компонента ошибок в них отсутствует. Напротив, если измерения основаны на соотношении (3), то при  $S/N \geq 10$  начинает доминировать не случайная, а систематическая ошибка измерений. А именно, оценка дисперсии скоростей завышается, что иллюстрируют рис. 5с и 6с. Оценки дисперсии скоростей, полученные из гаусс-аппроксимации профилей, больше реальных на 7–8 км/с и 20–25 км/с для IFR501 и IFR235 соответственно. Для ширин линий с  $\sigma_{real} > 100$  км/с такая систематическая ошибка незначительна. Однако при  $\sigma_{real} = 10 - 20$  км/с завышение дисперсии скоростей может достигать 100%. Это критично, например, в исследованиях кинематики ионизованного газа в областях звездообразования, когда необходимо выделить расширяющиеся оболочки или области, где скорости хаотических движений превышают скорость звука в межзвездной среде [10, 16]. В этих случаях необходимо использовать оценки дисперсии, даваемые аппроксимацией профилем Фойгта. Либо же, если по каким-



**Рис. 5.** Моделирование ошибок измерения кинематических параметров (по уровню  $1\sigma$ ). Расчет проводился для IFP501. Ромбики — аппроксимация гауссианой, черные кружки — профилем Фойгта. (а) Зависимость ошибки измерения лучевой скорости от уровня отношения сигнал-шум, средняя величина дисперсии скоростей составляла 50 км/с; (б) зависимость ошибки измерения дисперсии скоростей от уровня отношения сигнал-шум при тех же условиях; (с) сравнение исходных и измеренных дисперсий скоростей (для  $S/N = 20$ ).



**Рис. 6.** То же, что на рис. 5, но для IFP235. Рисунки (а) и (б) построены для случая средней дисперсии скоростей 200 км/с.

то причинам авторы предпочитают использовать гаусс-аппроксимацию, необходимо провести оценки систематических ошибок, аналогично тому, как это было сделано нами выше, и соответствующим образом скорректировать оценки, полученные по формуле (3).

Отметим, что альтернативный метод учета влияния аппаратного профиля ИФП, актуальный в случае многокомпонентных линий, предложен в работе [16], где авторы применяли методы восстановления (обратной свертки). Однако он применим только для спектров с относительно высоким отношением сигнал-шум.

#### 4. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ

Для обработки наблюдений, получаемых с ИФП на SCORPIO, на языке IDL 6.X нами написан

пакет программ IFPWID с многооконным дружественным интерфейсом (рис. 7). Тексты программ находятся в открытом доступе по адресу <http://www.sao.ru/hq/moisav/soft>. Ниже в этом разделе представлена основная последовательность обработки данных с помощью этих программ. Мы не будем останавливаться на детальном описании большинства используемых алгоритмов — калибровки шкалы длин волн, фотометрической коррекции, вычитания линий ночного неба и т.п. (см. достаточно подробную статью [1]), только кратко перечислим исходные для обработки наборы ПЗС-кадров:

- *OBJECT* — интерферограммы исследуемого объекта.
- *NEON* — изображения интерференционных колец от эмиссионной линии, выделяемой узкополосным фильтром из спектра встроенной калибровочной лампы с He-Ne-Ar на-

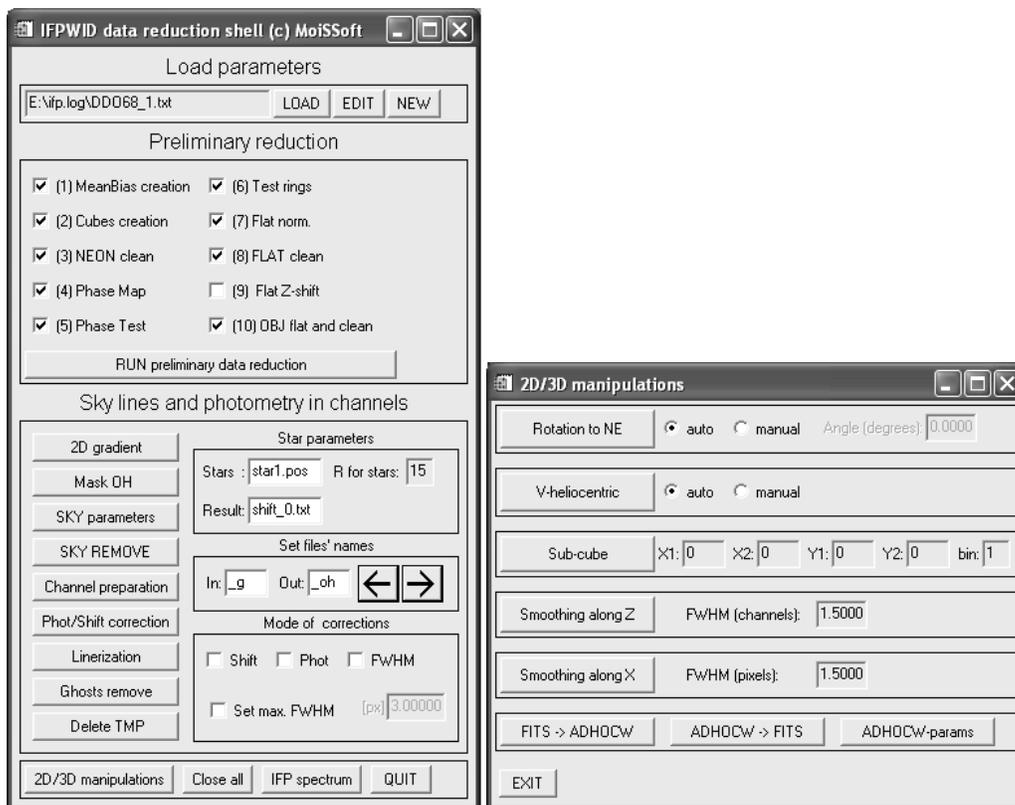


Рис. 7. Интерфейс программы IFPWID. Слева — главное меню, справа — меню работы с откалиброванными кубами.

полнением. Обычно эта калибровка проводится до и после наблюдательной ночи.

- *FLAT* — интерферограммы равномерной заливки “плоского поля” от встроенной лампы непрерывного спектра, полученные с тем же узкополосным фильтром, который использовался при наблюдениях объекта.
- *TEST* — изображения колец от лампы линейчатого спектра в отдельных каналах ИФП, получаемые вместе с накоплениями объекта в том же положении телескопа. Используются для мониторинга точности сканирования и для контроля смещения центра колец из-за гнуптий прибора.

#### 4.1. Формирование кубов данных

Первый этап обработки обычно не требует использования специальных настроек, как правило, достаточно указать лишь номер наблюдательной ночи, шаблоны для имен файлов и требуемый формат кадров (иногда при наблюдениях с ИФП считывается лишь фрагмент ПЗС). Всю остальную необходимую информацию (параметры ИФП, номера спектральных каналов и т.п.) программа получает из дескрипторов соответствующих FITS-файлов, которые заполняются автоматически в

процессе наблюдений. Поэтому пользователю достаточно лишь выделить в меню галочками требуемые шаги обработки (см. верхнюю часть меню на рис. 7) и нажать кнопку “запуск” (“run”). Кратко перечислим эти шаги (курсивом выделены их названия в программе обработки):

- Поиск и усреднение кадров тока смещения, снятых в требуемом режиме считывания ПЗС (*MeanBias creation*). Построенный кадр *superbias* будет вычитаться из всех кадров накоплений объекта и калибровок. “Горячие” пиксели у применяемой ПЗС практически отсутствуют, темновой ток мал, поэтому на экспозициях длительностью в несколько минут им можно пренебречь.
- Формирование кубов данных из отдельных кадров (*Cubes creation*). Вычитается *superbias*, маскируются дефектные колонки. Далее осуществляется обработка уже не двумерных изображений, а трехмерных кубов (поканально собранных интерферограмм объекта и калибровок). Кубы сохраняются в стандартном формате FITS (NAXIS=3).
- Чистка следов космических частиц в кубах накоплений света от калибровочных ламп с

линейчатым (*NEON clean*) и непрерывным (*FLAT clean*) спектром. Используется простой  $\sigma$ -фильтр: отсчеты в спектре, отличающиеся от среднего на установленное пороговое значение, заменяются полусуммой отсчетов из соседних каналов.

- Построение карты фазового сдвига по данным аппроксимации линий в кубе NEON профилем Лоренца (*Phase map*). При необходимости — коррекция неравномерности сканирования калибровочного куба, подробнее см. [1].
- Проверка точности построения шкалы длин волн (*Phase test*). Куб NEON корректируется за фазовый сдвиг, после чего в каждом пикселе измеряется положение эмиссионной линии лампы линейчатого спектра.
- Определение поправок к построенной по калибровочному кубу шкале длин волн (*Test rings*). Вычисляются смещения (по обеим координатам в плоскости ПЗС и по длине волны) накоплений TEST относительно куба NEON (учет гнуптий прибора и мониторинг точности сканирования ИФП).
- При необходимости — коррекция относительных вариаций яркости лампы FLAT в течение сканирования калибровочного куба (*Flat norm*).
- Измерение смещения между максимумами пропускания узкополосного фильтра, измеренными по кубу FLAT и по спектрам выбранных звезд в поле объекта (*Flat Z-shift*). Обычно эта процедура необходима только при наблюдениях с IFP235, когда полуширина узкополосного фильтра заметно меньше, чем спектральный диапазон между соседними порядками интерференции. Обычно смещение близко к нулю, но с некоторыми фильтрами оно может достигать 2.0 – 3.5 Å.
- Деление куба объекта на плоское поле (учет кривой пропускания узкополосного фильтра), чистка следов космических частиц (*OBJ flat and clean*).

#### 4.2. Вычитание линий неба и приведение к шкале длин волн

Далее следует набор процедур обработки, которые чаще, чем при сборке кубов, требуют вмешательства пользователя. Им соответствуют кнопки основного интерфейса (рис. 7а слева), перечисленные ниже курсивом. Как правило, обработка выполняется в следующем порядке:

- Коррекция неравномерности фона (*2D gradient*). При наблюдениях объектов в некоторых узкополосных фильтрах в кубе объекта даже после деления на FLAT остается заметный градиент яркости фона, особенно если имела место дополнительная подсветка от Луны. Скорее всего, это вызвано остаточной неравномерностью засветки от лампы FLAT в комбинации с особенностями интерференционных покрытий конкретных фильтров. Для коррекции этого эффекта пользователь может задать параметры двумерного распределения яркости, на которое нормируется куб объекта.
- Создание маски для вычитания спектра ночного неба (*Mask ON*). За основу берется изображение суммы каналов куба объекта, области с яркостью меньше заданного предела считаются “фоном”. При необходимости полученную маску можно редактировать.
- Задание параметров для вычитания фона неба (*SKY parameters*). Применяемая нами методика вычитания неба изложена в статье [1]. Кратко ее суть заключается в том, что в каждом канале куба OBJ эмиссия фона неба усредняется по азимутальному углу в узких кольцах, с центром на оптической оси ИФП, с учетом маски, построенной на предыдущем этапе обработки. Средний профиль яркости вычитается из интерферограммы объекта. Пользователь может устанавливать различные режимы такого вычитания, менять ширину колец, в которых выполняется усреднение, фиксировать центр колец или задавать автоматический поиск его в каждом канале. При необходимости усреднение можно проводить в отдельных секторах (что полезно для учета вариаций аппаратного контура по полю) и т.п.
- Вычитание спектра ночного неба согласно заданным выше параметрам (*Sky remove*).
- Фотометрия звезд в каждом канале куба объекта (*Channels preparation*). Для звезд из предварительно созданного списка измеряются относительные смещения центра изображения, вариации FWHM и интегрального потока. Строятся усредненные зависимости этих параметров от номера канала в кубе.
- Фотометрическая коррекция куба объекта, на основании результатов поканальной фотометрии звезд (*Photo/Shift corrections*).

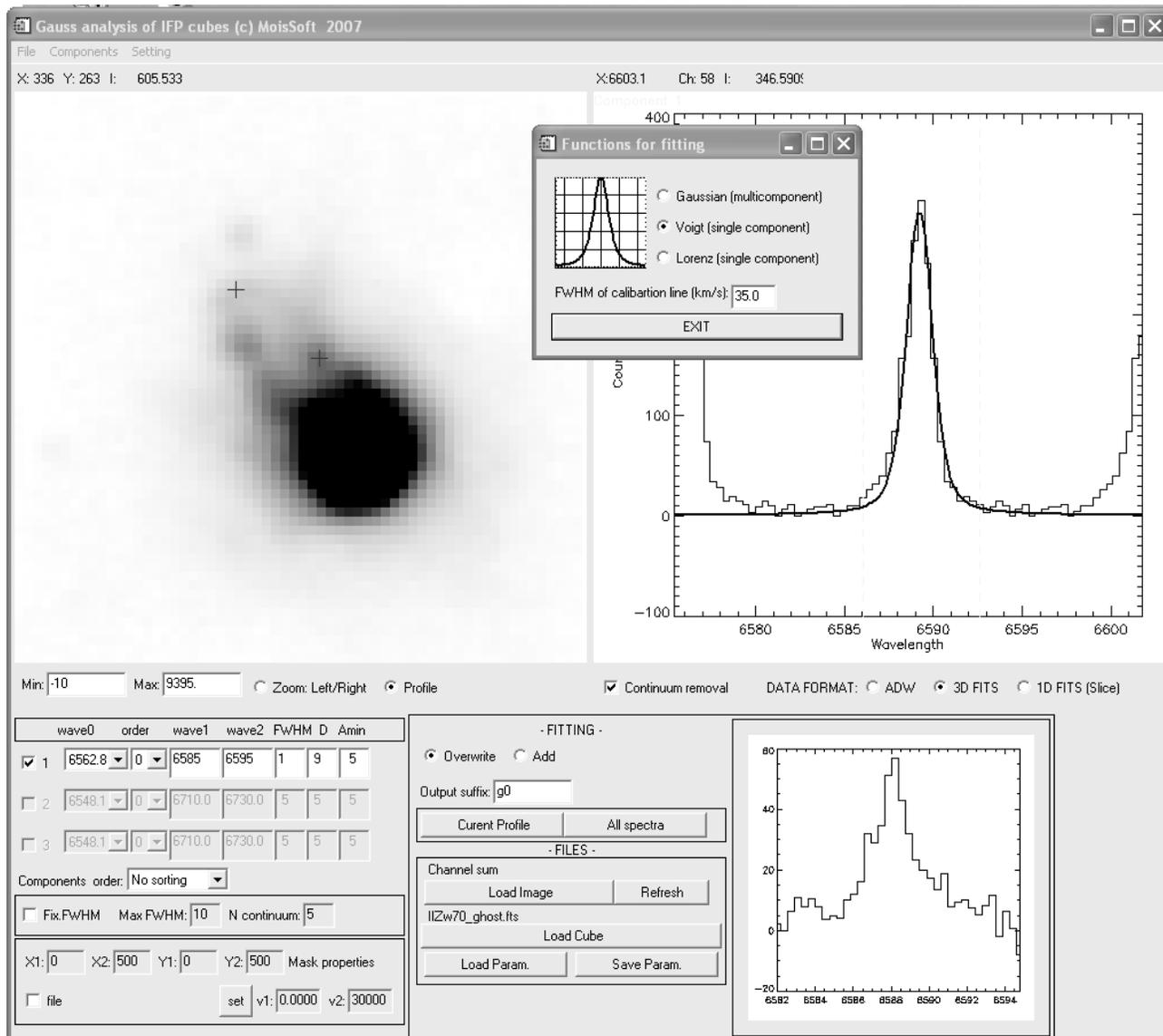


Рис. 8. Интерфейс программы анализа профилей эмиссионных линий.

Делаются корректирующие смещения каналов, осуществляется учет вариаций атмосферной прозрачности (умножение каналов на рассчитанные коэффициенты) и качества звездных изображений (свертка с двумерными гауссианами).

- Перевод куба объекта в шкалу длин волн (*Linearization*).
- Вычитание бликов с использованием процедуры, описанной в разделе 2 (*Ghosts remove*).

#### 4.3. Работа с откалиброванными кубами

Итогом вышеописанных этапов обработки является куб данных, переведенный в шкалу длин

волн, в котором максимально учтены все аппаратные эффекты. В таком виде он может анализироваться с помощью различных программных средств, в зависимости от желания пользователя и от поставленной задачи. Предусмотрена возможность преобразования данных в формат популярной системы обработки ADHOC<sup>2)</sup>. Ниже мы описываем последовательность работы с помощью наших программных средств, целью которой является построение карт лучевых скоростей и дисперсии скоростей в эмиссионных линиях.

На рис.7 (справа) показано меню работы с от-

<sup>2)</sup> Программный пакет ADHOC разработан by J. Boulesteix (Observatoire de Marseille) и доступен по адресу <http://http://www.oamp.fr/adhoc/adhocw.htm>.

калиброванными кубами. Здесь выполняются следующие процедуры (названия выделены курсивом):

- Разворот куба к “правильной” ориентации изображений (север — вверх, восток — слева), поскольку наблюдения могут проводиться в произвольном (или специально выбранном) позиционном угле (*Rotation to NE*). Угол поворота вычисляется по данным дескрипторов заголовка FITS-файла, с точностью  $0.1^\circ$ . Если требуется лучшая точность, необходимо выполнять астрометрическую привязку по звездам поля.
- Вычисление поправки лучевых скоростей за движение Земли вокруг Солнца (*V-heliocentric*). Необходимая для расчетов информация черпается из дескрипторов заголовка FITS-файла.
- При необходимости вырезается фрагмент куба, содержащий исследуемый объект (*Sub-cube*). Как правило, именно в таком виде обработанные ИФП-кубы представлены в нашей базе данных ASPID [17].
- Сглаживание кубов одномерной и двумерной гауссианами заданной ширины соответственно вдоль спектральной (*Smoothing along Z*) и пространственных (*Smoothing along X*) координат.

Для построения полей скоростей, карт дисперсии скоростей, монохроматических изображений в эмиссионной линии и в континууме применяется программа GAUS, основной интерфейс которой показан на рис. 8. С помощью этой программы можно проводить анализ индивидуальных профилей в выбранных пикселях куба данных, применяя аппроксимации профилей эмиссионных линий функциями Лоренца, Фойгта или Гаусса. В последнем случае возможна многокомпонентная гаусс-аппроксимация. Расчет интеграла в (5) проводится через стандартную функцию VOIGT языка IDL. Главная задача, решаемая с помощью данной программы, — автоматическое отождествление эмиссионных линий в кубе данных и их аппроксимация теми или иными функциями для заданных параметров. Это важно потому, что количество пикселей с полезным сигналом в наших кубах данных может достигать сотен тысяч, так что индивидуальный подход к каждому спектру попросту невозможен. Результатом такой процедуры являются двумерные карты параметров профиля (доплеровские скорости, поток в линии и т. д.).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приводится краткое описание программ, которые в данный момент применяются для обработки наблюдений, выполняемых со сканирующим ИФП, работающим в составе прибора SCORPIO. Мы считаем, что представленный программный комплекс полностью удовлетворяет требованиям тех научных задач, которые решаются на 6-м телескопе САО РАН с помощью этого метода наблюдений. Представляется, что дальнейшая эволюция пакета обработки данных будет связана с реализацией в САО РАН проекта многорежимного редуктора светосилы нового поколения SCORPIO-2. Прежде всего мы надеемся, что использование нового осветителя тракта калибровки позволит отказаться от процедур коррекции ошибок “плоского поля” (неравномерность остаточного фона, сдвиг куба FLAT по шкале длин волн, наблюдаемый в некоторых узкополосных фильтрах и т. п.). Большой уровень автоматизации SCORPIO-2 (по сравнению с современной версией прибора) позволит еще больше унифицировать процесс получения наблюдательных данных с ИФП, отказаться от “ручной” установки параметров в ряде процедур, прежде всего это касается вычитания спектра ночного неба. В этом случае будет достаточно просто построить систему автоматической потоковой (pipeline) обработки данных наблюдений со сканирующим ИФП.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы считают необходимым поблагодарить А. А. Смирнову за помощь в работе над текстом статьи. Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ (проект 06-02-16825) и гранта Президента Российской Федерации (проект МК1310.2007.2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. V. Moiseev, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **54**, 74 (2002); astro-ph/0211104.
2. S. Gordon, B. Koribalski, S. Houghton, and K. Jones, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **315**, 248 (2000).
3. O. Daigle, C. Carignan, O. Hernandez, et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **368**, 1016 (2006).
4. В. Л. Афанасьев, А. В. Моисеев, Письма в Астрон. журнал **31**, 269 (2005).
5. J.-L. Gach, O. Hernandez, J. Boulesteix, et al., Publ. Astronom. Soc. Pacific **114**, 1043 (2002).
6. J. Bland-Hawthorn, in *Proceedings of IAU Colloquium 149 on Tridimensional Optical Spectroscopic Methods in Astrophysics, Marseille, France, 1994*, Eds. by G. Comte, and M. Marcellin (ASP Conference Series, San Francisco, 1995), p. 72.

7. D. H. Jones, P. L. Shopbell, J. Bland-Hawthorn, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **329**, 759 (2002).
8. Т. А. Лозинская, А. В. Моисеев, Н. Ю. Подорванюк, *Письма в Астрон. журнал* **29**, 95 (2003).
9. Т. А. Лозинская, А. В. Моисеев, В. Ю. Авдеев, О. В. Егоров, *Письма в Астрон. журнал* **32**, 403 (2006).
10. I. Martínez-Delgado, G. Tenorio-Tagle, C. Muñoz-Tuñón, et al., *Astronom. J.* **133**, 2892 (2007).
11. T. A. Movsessian, T. Yu. Magakian, J. Bally, et al., *Astronom. and Astrophys.* **470**, 605 (2007).
12. Т. А. Лозинская, А. В. Моисеев, Н. Ю. Подорванюк, А. Н. Буренков, *Письма в Астрон. журнал* **34**, 243 (2008).
13. M. Rozas, A. Zurita, J. E. Beckman, and D. Pérez, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **142**, 259 (2000).
14. C. Muñoz-Tuñón, V. Gavryusev, and H. O. Castoneda, *Astronom. J.* **110**, 1630 (1995).
15. K. Gebhardt, C. Pryor, T. B. Williams, and J. E. Hesser, *Astronom. J.* **107**, 2067 (1994).
16. M. Relaño, and J. E. Beckman, *Astronom. and Astrophys.* **430**, 911 (2005).
17. I. Chilingarian, V. Afanasiev, F. Bonnarel, et al., in *Proceeding of the conference on Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI, Tucson, USA, 2006*, Eds. by R. A. Shaw, F. Hill, and D. J. Bell (ASP Conference Series, 2007), p. 271; arXiv:0711.0341 [astro-ph].

## REDUCTION OF CCD OBSERVATIONS MADE WITH THE FABRY-PEROT SCANNING INTERFEROMETER. II. ADDITIONAL PROCEDURES

A. V. Moiseev, O. V. Egorov

We describe a software package used at the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences to reduce and analyze the data obtained with the Fabry-Perot scanning interferometer. We already described most of the algorithms employed in our earlier paper [1]. In this paper we focus on extra procedures required in the case of the use of a high-resolution Fabry-Perot interferometer: removal of ghosts light and measurement of the velocity dispersion of ionized gas in galactic and extragalactic objects.