

ДВУХПРОЦЕССОРНЫЙ АППАРАТУРНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС — СКАНЕР БТА

III. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ЭКСПРЕССНАЯ ОБРАБОТКА ЗВЕЗДНЫХ СПЕКТРОВ

И. М. Копылов, Н. Н. Сомов, Т. А. Сомова

Обсуждаются программы быстрой обработки звездных спектров, получаемых с помощью телевизионного 1000-канального спектрофотометра БТА. Программное обеспечение для обработки спектров ориентировано на аппаратные средства, включающие ЭВМ СМ-4 с системой магнитных дисков, ЭВМ «Электроника-60», графический дисплей ЭПГ СМ-4, планшетный и рулонный графопостроители, линии связи между ЭВМ.

Испытания программ, проведенные при обработке спектров (сканов) SS433, показали хорошее согласие «машинных» и «ручных» параметров спектральных линий. Приведены точности измерения этих параметров.

The programs of rapid processing of stellar spectra, obtained with the help of television 1000-channel spectrophotometer of BTA are discussed. The program software for spectrum processing is oriented on the apparatus facilities, including the computer SM-4 with the system of magnetic disks, the computer «Elektronika-60», the graphic display EPG SM-4, the board and roll curve plotters and communication lines between the computers.

The program testings, carried out during the processings of SS 433 spectra showed a good agreement of «computer» and «hand» parameters of spectral lines. Measurement accuracies of these parameters are given.

Оснащение обсерваторий новыми крупными телескопами и современной спектральной и светоприемной аппаратурой, а также выросшая в последнее время скорость получения спектральной информации настоятельно требуют скорейшего решения задачи полной автоматизации получения и обработки спектров.

Значительный интерес к исследованию релятивистского объекта SS433 [1—3] и оптических компонентов других слабых рентгеновских источников, катаклизмических переменных, вспыхивающих звезд и других типов объектов потребовал нового подхода к методике получения и обработки спектральных данных на 6-метровом телескопе с помощью телевизионного 1000-канального спектрофотометра (сканера) БТА, особенно после введения ряда аппаратных усовершенствований и создания двухпроцессорного аппаратно-программного комплекса — сканера БТА [4, 5]. Для использования в полной мере нововведений в цифровой части сканера и для реализации преимуществ, которые получают астрономы благодаря включению в аппаратуру ЭВМ, графического дисплея, накопителей на магнитных лентах и дисках, графопостроителей и других устройств, подключенных через блоки системы КАМАК к телевизионному сканеру, необходимо было решить проблему создания соответствующего математического обеспечения, позволяющего работать с телевизионным комплексом в различных режимах регистрации информации во время наблюдений (при получении спектров) и дающего возможность вести обработку получаемой спектральной информации как в реальном времени, так и в автономном режиме после наблюдений.

Астрофизические задачи по исследованию природы различных звездных и других объектов часто требуют изучения быстрой динамики спектров, определения его характеристик в различных фазах орбитального периода, различных фазах вспышек и т. д., т. е. приводят исследователей к необходимости освоения

методов быстрой спектроскопии звезд. Телевизионный сканер после организации записи информации на магнитную ленту и введения покадровой регистрации для фиксирования каждого пришедшего фотона в отдельности позволяет добиться высокого спектрального ($0.5-2 \text{ \AA}$) и временного (5—10 мин, вплоть до 33 мс) разрешения с целью изучения кратковременных изменений континуального и линейчатого спектров, исследования динамики контуров изучаемых линий на малых временах и т. д. Такой подход к получению и полностью автоматической обработке спектральных данных позволяет располагать уникальным материалом, открывающим принципиально новые возможности для детального изучения и понимания физических процессов, происходящих в подобного рода объектах.

Обработка цифрового спектроскопического материала, собираемого большим телескопом в массовом порядке, обычно включает много стандартных рутинных операций, таких как вычитание фона неба, построение дисперсионных кривых, фотометрическая калибровка, сглаживание шумов и разрисовка данных [6]. Эти операции могут быть нужны по отдельности или в совокупности в заранее определенной последовательности.

В САО уделялось и уделяется должное внимание разработке методик и созданию программ для автоматической обработки, в частности, фотографических спектров [7—14] и сканов, получаемых на телевизионном сканере [5, 6]. Описываемый нами набор программ позволяет обрабатывать как сканерные спектры, так и спектры, полученные фотографическими методами, в случае предварительной оцифровки спектрограмм, например, на комплексе АМД [15, 16].

Обработка и интерпретация результатов детальных количественных спектральных исследований сильно тормозится длительностью и трудоемкостью фотометрической редукции спектров, особенно если редукцию вести «вручную». Такая редукция становится просто невозможной в случае применения быстрой спектроскопии, когда надо обрабатывать не единицы спектров, а нужна массовая обработка десятков, сотен и иногда тысяч спектров, получаемых за одну ночь наблюдений со сканером БТА.

Методики наблюдений. Общие принципы методики наблюдений и редукции получаемой информации с помощью телевизионного сканера БТА уже описывались ранее нами и другими исследователями [6, 17]. Основные методики наблюдений на сходной с нашей системе счета фотонов Англо-Австралийского телескопа и методы первичной обработки описаны в [18].

Соединение сканера с измерительно-вычислительным комплексом на базе ЭВМ СМ-4 и разработка специализированного языка программирования СИПРАН [5] существенно изменили как сам процесс наблюдений, так и обработку спектров. В настоящее время сканер БТА позволяет проводить экспрессную обработку получаемых данных в процессе наблюдений: учет фона неба, исправление неоднородностей чувствительности фотокатода, построение дисперсионных кривых и линеаризацию шкалы длин волн, суммирование спектров, разрисовку спектров в шкале длин волн на графопостроителях.

Выбор методики наблюдений на сканере определяется, по нашему мнению, конкретной астрофизической задачей и степенью стабильности системы в целом, чтобы вносились минимальные и (или) количественно контролируемые позиционные сдвиги за необходимое время экспозиции [6].

Нами на практике были опробованы две методики наблюдений:

1) поочередное накопление спектров объекта и фона неба на разных линейках (условно на линейках «0» и «1»), расположенных так, чтобы направление дисперсии спектра было перпендикулярно к направлению строчной развертки суперкремникона [6]. Такая методика регистрации спектра на двух линейках позволяет правильно вычитать спектр фона из спектра «объект+фон» с той же линейки. Суммируя спектры объекта без фона с разных линеек, мы усредняем неоднородности чувствительности разных линеек и улучшаем статистический шум в спектре;

2) регистрация объекта и фона на постоянных линейках (тех же «0» и «1»), но с исправлением затем неравномерности чувствительности фотокатода ЭОПа на различных линейках с помощью эталонного источника излучения.

Фотокатоды обладают тем свойством (в отличие от фотопластинки), что для учета неоднородностей чувствительности их можно засветить еще раз равномерной непрерывной засветкой и учитывать затем эти неоднородности. Для этого необходимо, предварительно сгладив спектр непрерывной засветки, разделить полученный спектр объекта на спектр непрерывной засветки на той же линейке, а фон разделить на спектр непрерывной засветки на другой линейке. Для практически полного исправления неоднородностей в спектре желательно, чтобы лампа непрерывной засветки была накоплена до статистической точности и чтобы позиционная нестабильность системы в течение ночи не превосходила 0.5 канала [18]. Иначе деление на лампу только внесет в спектр дополнительную систематическую ошибку. Попытки (для экономии времени) накапливать спектр непрерывной засветки в аналоговом режиме [19] не дали ожидаемых результатов, так как при этом неоднородности исправляются не полностью. Таким образом, для лучшего исправления локальных неоднородностей фотокатода необходимо спектр и непрерывную засветку снимать в одном режиме. При этом рекомендуется получать спектр лампы с вечера (до наблюдений) и под утро (после наблюдений), чтобы заодно проверить и воспроизводимость спектра лампы. При хорошо накопленной непрерывной засветке (до 1 % фотометрической точности) и 2%-ной статистической точности в накопленном исправляемом спектре объекта получаемая нами предельная фотометрическая точность равнялась $\sim 2\%$. Так как позиционная нестабильность системы в процессе наблюдений на временах порядка 10 ч превосходит половину канала (накладывается еще не до конца учтенное влияние магнитного поля Земли), то мы считаем наиболее оптимальными наблюдения с регулярной калибровкой на спектр сравнения (Ar—He—Ne) и сменой положения объекта и фона на строках (линейках).

Однако необходимость решения таких, например, задач, как исследование спектральной переменности нестационарных звезд на временах в несколько часов, когда периодическая калибровка становится явной помехой (частично тратится рабочее время телескопа и нарушается непрерывность ряда наблюдений), потребовала внедрения в практику наблюдений длительных экспозиций с последующей математической коррекцией спектров за счет положения телескопа и по спектрам непрерывной засветки, полученным в утренних и вечерних сумерках.

Наш опыт работы с телевизионным сканером показывает, что методика наблюдений по способу 2 требует существенного повышения позиционной стабильности светоприемного тракта сканера, без чего трудно добиться надежного исправления фотометрических искажений, вносимых неоднородной чувствительностью каналов на разных линейках.

Организация информации, библиотека программ. Как уже отмечалось ранее в [4], управление комплексом сканера автоматизировано, что позволяет в процессе наблюдений записывать поступающую информацию на магнитный диск ЭВМ СМ-4 в виде группы файлов и, таким образом, организовывать библиотеку спектров (банк данных) в виде двумерной матрицы файлов с цифровыми именами типа «A00000.000». Группы файлов отличаются именами (символами до точки), а файлы в группе — расширениями (символами после точки). Мы используем такую организацию информации, так как она удобна при последующей обработке по программам на СИПРАНе. Для каждой группы организуется и текстовый файл (до 512 символов), в который записывается вся нужная при последующей обработке информация, т. е. организуется «паспорт» группы. Паспорт содержит имя группы, название изучаемого объекта, дату наблюдений, координаты объекта, время начала и конца экспозиции, длительность экспозиции, положение телескопа (A, Z), погодные условия, качество изображений, номер применяемой дифракционной решетки, спектральный диапазон и т. д. Часть информации, такая как дата и время, заносится в «паспорт» автоматически, другая вводится с терминала комплекса самим астрономом. Далее в группе следуют файлы со спектрами сравнения и спектрами объекта и фона неба. Длина или количество файлов в группе при наблюдениях ограничивается 999 файлами.

Заметим здесь, что, помимо главной задачи — регистрации и систематизации информации, в программу наблюдений можно включать редуцированные

блоки программ. Так, например, при получении временной развертки спектров со временем > 5 мин имеется возможность параллельного выполнения редукации и предварительной обработки информации. Можно исправить накопленные ранее сканы за неравномерность чувствительности фотокатода, вычесть спектр ночного неба, перевести сканы в линейную шкалу длин волн и последовательно представить графически все сканы во времени на рулонном графопостроителе, т. е. сделать временную развертку, что, на наш взгляд, очень важно при поисках спектральной переменности объектов. При наблюдении слабых стационарных объектов с экспозициями порядка 1 ч возможности экспрессной обработки быстро возрастают и будут в итоге определяться поставленной астрофизической задачей и библиотекой программ на СИПРАНе, которая постоянно дорабатывается и пополняется хорошо проверенными и положительно зарекомендовавшими себя программами.

Библиотека программ на СИПРАНе предназначена как для непосредственного обеспечения процесса наблюдений на телевизионном сканере, так и для обработки информации, получаемой на комплексе. Она состоит из функциональных модулей различного уровня. Если командам языка программирования СИПРАН поставить в соответствие 0-уровень, то в библиотеке к настоящему времени содержатся модули до 6-го уровня иерархии, т. е. модули, которые обращаются к модулям более низкого уровня как к подпрограммам. Общее количество модулей в библиотеке программ сейчас около 100, поэтому мы лишь бегло опишем разделы библиотеки с краткими комментариями: с самой библиотекой в виде текстов программ и комментариев к ним можно ознакомиться в САО.

Можно выделить следующие разделы библиотеки.

I. Обеспечение сбора информации с регистрирующей аппаратуры, управление процессом наблюдений и организация библиотеки спектральных данных.

II. Редукация спектральной информации:

1) исправление спектров за локальные неоднородности чувствительности фотокатода и мишени телевизионной трубки;

2) автоматическое и интерактивное отождествление спектров сравнения;

3) построение дисперсионных кривых и линейаризация шкалы длин волн. Имеется возможность выбора метода построения дисперсионной кривой по желанию и задаче астронома — метод сплайновой аппроксимации [20], метод наименьших квадратов, ИНТЕР [21] и др.;

4) исправление спектров за спектральную чувствительность аппаратуры;

5) коррекция спектров за положение телескопа (A, Z), учет динамической коррекции в случае необходимости;

6) автоматическое, полуавтоматическое и интерактивное проведение непрерывного спектра в спектре исследуемого объекта;

7) фильтрация (по желанию исследователя) спектров и шумов;

8) нормировка спектров на максимальную интенсивность;

9) сложение и вычитание спектров (для получения лучшего отношения сигнал/шум, вычитания фона ночного неба, поиска переменности и т. д.);

10) определение длин волн, лучевых скоростей и фотометрических параметров линий в спектре [6];

11) обеспечение разрисовок спектров и графиков на планшетном и рулонном графопостроителях;

12) обеспечение работы с графическим дисплеем ЭПГ ЭВМ СМ-4: визуализация получаемой спектральной информации в реальном времени; интерактивное построение непрерывного спектра и проверка правильности его проведения; отождествление, отбор и выделение спектральных линий для определения всех параметров этих линий и т. д.;

13) декодирование спектров, полученных в режиме покадровой записи на магнитной ленте накопителя «ИЗОТ», и анализ получаемой информации по быстрой спектроскопии;

14) редукационные программы, использующие предыдущие разделы, для полной или частичной редукации отдельных спектров; частные и объединенные операции над целой группой спектров до вычисления параметров спектральных линий или временных рядов параметров спектральных линий;

15) вывод и хранение всех числовых данных, получаемых из спектра (спектров). Например, распечатка полученных параметров в виде таблицы на АЦПУ ЭВМ СМ-4, запись всех вычисленных параметров на магнитный диск ЭВМ СМ-4 для дальнейшего анализа, разрисовка графиков изучаемых параметров на рулонном или планшетном графопостроителях.

Итак, комплекс программного обеспечения обработки спектров астрономических объектов позволяет визуализировать исходную оцифрованную информацию и результаты обработки на графопостроителях и графическом дисплее, вводить и перекодировать в код ЭВМ СМ-4 исходную информацию и буферизовать ее в случае необходимости на магнитной ленте, фильтровать с варьируемым набором фильтров, осуществлять перевод спектров в остаточные интенсивности, проводить уровень непрерывного спектра, строить дисперсионную кривую, переводить номера каналов в длины волн, определять основные параметры спектральных линий (эквивалентную ширину W_{λ} , центральную глубину R_c , длину волны λ_i , середины линии на различных уровнях остаточной интенсивности (r_{ν}), полуширину $\Delta\lambda$ (1/2), лучевую скорость v_r).

Ввод информации в ЭВМ СМ-4. Возможности визуализации. В первоначальном варианте сканера информация выводилась на перфоленту, и это в свою очередь поставило задачу ввода перфолент в ЭВМ СМ-4 для их дальнейшей обработки. Такая работа была проделана для перекодировки цифровой информации, поступающей с мини-ЭВМ «Электроника-100И», микро-ЭВМ «Электроника-60» и комплекса АМД. Кроме того, информация, вводимая в ЭВМ СМ-4, иногда содержится на различных типах носителей (магнитные ленты, перфоленты). Программы ввода с разных носителей включены в библиотеку программ сканера. На графопостроителях двух типов (рулонный с рабочим полем 42×8000 см и планшетный с размерами рабочего поля 25×35 см) можно выдавать в любом месте рабочего поля координатные оси, координатные рамки, символьную информацию.

Как правило, после процедуры систематизации спектральной информации производится ее визуализация на графическом дисплее или на планшетном графопостроителе. По изображению на дисплее или на графопостроителе для ускорения дальнейшей обработки и сокращения машинного времени можно провести отождествление линий спектра сравнения, согласиться с автоматически проведенным уровнем непрерывного спектра или изменить некоторые точки уровня континуума; проконтролировать автоматическое выделение линий или указать границы изучаемых линий. Итак, дисплей позволяет просматривать результаты обработки сканов шаг за шагом на разных этапах обработки, что является немаловажным фактором в обработке спектров.

Построение дисперсионных кривых. Перевод номеров каналов спектров, полученных на сканере, в соответствующие им длины волн является одной из обязательных процедур цифровой редукции сканов при определении лучевых скоростей изучаемых спектральных деталей в исследуемых спектрах.

При нашей методике наблюдений для калибровки спектров по длинам волн используется в качестве спектра сравнения спектральная лампа с He—Ar—Ne-наполнением. При этом спектр сравнения снимается до и после получения спектра объекта. Если экспозиция объекта дробилась, например, на две части, то спектр сравнения желательнее снять и в середине этого интервала. В результате дисперсионные кривые к данному объекту и фону будут строиться по четырем или по шести спектрам сравнения.

Особенностью конструкции сканера является наличие в светоприемной части многокаскадного ЭОП, который обладает S-дисторсией. Из-за этого вид спектра на телевизионном мониторе сканера не только отличается от прямой линии (рис. 1, а), но и имеет неравномерную вдоль длины дисперсию (рис. 1, б).

Для построения дисперсионной кривой достаточно задать точные положения 10—15 линий спектра сравнения, расположенных равномерно по всему скану с расстояниями между линиями 30—40 каналов. Точность определения положений линий спектра сравнения зависит от статистической точности в этих линиях. При накоплении в максимуме линии ~ 1000 событий точность определения положения такой линии составляет 0.03—0.05 канала, при статистике ~ 300 отсчетов в максимуме спектральной линии точность ее положения будет уже

порядка 0.4 канала, что при переводе в длины волн при дисперсии 100 Å/мм составит соответственно 0.078—0.13 и 0.26 Å, или в лучевых скоростях 3.9—9.5 и 13.0 км/с соответственно (для длины волны 6000 Å).

Мы разработали вариант полуавтоматического и полностью автоматического построения дисперсионной кривой (ДК). В случае полуавтоматического варианта работы программы на экране дисплея (или на графопостроителе) появляется изображение спектра сравнения, далее бегающей точкой (маркером) можно пометить границы реперных линий, по которым будет строиться дисперсионная кривая, и координаты этих линий, полученные ЭВМ методом центров тяжести или по центру линии при методе сплайновой интерполяции [20], будут использованы для построения дисперсионной кривой. После окончания этой процедуры

и передачи координат линий спектра сравнения в ЭВМ СМ-4 машина просит передать эталонные длины волн соответствующих помеченных реперных линий и просит указать метод

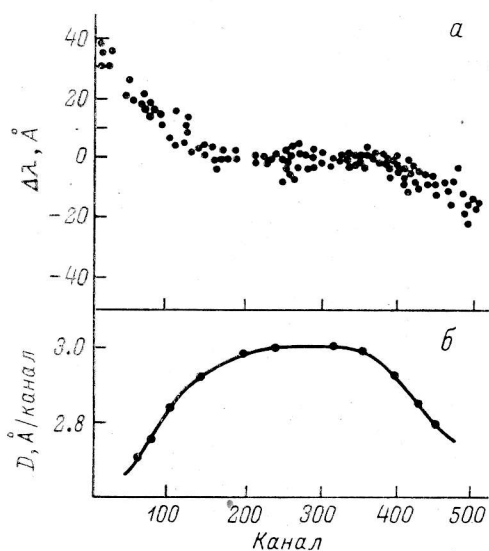


Рис. 1. Некоторые характеристики сочетания спектрографа UAGS с телевизионным сканером (в качестве светоприемной аппаратуры использовался трехкаскадный ЭОП УМ-92 и телевизионная трубка суперкремникон).

a — нелинейные составляющие дисперсионной кривой, найденные по большому количеству сканов спектра сравнения. Спектральный материал получался с дифракционной решеткой 625"/мм. По оси абсцисс отложены номера каналов, по оси ординат — отклонения $\Delta\lambda$ от линейной дисперсионной кривой; *b* — кривая дисперсии для сочетания дифракционной решетки 625"/мм и телевизионного сканера (по оси абсцисс — номера каналов, по оси ординат — значение дисперсии на канал).

построения дисперсионной кривой: метод наименьших квадратов (с аппроксимацией полиномом третьей степени), кусочно-квадратичной сплайн-интерполяции [11], сплайновой аппроксимации [20] или INTER [24]. При этом положения реперных линий определяются как средние значения, получаемые по центрам тяжести линий двух соседних спектров сравнения (отдельно для каждой линейки).

Коротко опишем алгоритм автоматического построения дисперсионных кривых. Условно процедуру автоматического построения дисперсионной кривой можно разбить на три этапа:

- 1) выделение реперных линий и точное определение их положений;
- 2) автоматическое отождествление линий спектра сравнения;
- 3) генерация дисперсионной кривой.

Для выделения линий спектра сравнения необходимо провести некоторую кривую таким образом, чтобы все точки в спектре выше нее принадлежали бы линиям (рис. 2, *a*). По сути дела это та же операция задания границ линий, которую мы на дисплее могли выполнять маркером вручную. Для осуществления такой процедуры можно провести «континуум» и поднять его до уровня, убирающего мелкие пенужные линии, или просто провести прямую, обрезаящую «шум». Точки пересечения такой кривой (прямой) с линиями спектра сравнения и дадут границы линий. Зная границы линий, уже легко вычислить автоматически положения линий спектра сравнения. Это может осуществляться теми же вышеописанными методами: 1) по центрам тяжести; 2) методом поиска центра линии с использованием интерполяции интенсивностей в линии полиномом третьей степени. Оба эти метода дают практически одинаковую точность.

Зная положения всех линий спектра сравнения, которые вычислила ЭВМ, задав таблицу или атлас отобранных лабораторных длин волн спектра сравнения, а также среднюю дисперсию и диапазон изменения дисперсии, можно поставить в соответствие табличные длины волн и изменение положения линий.

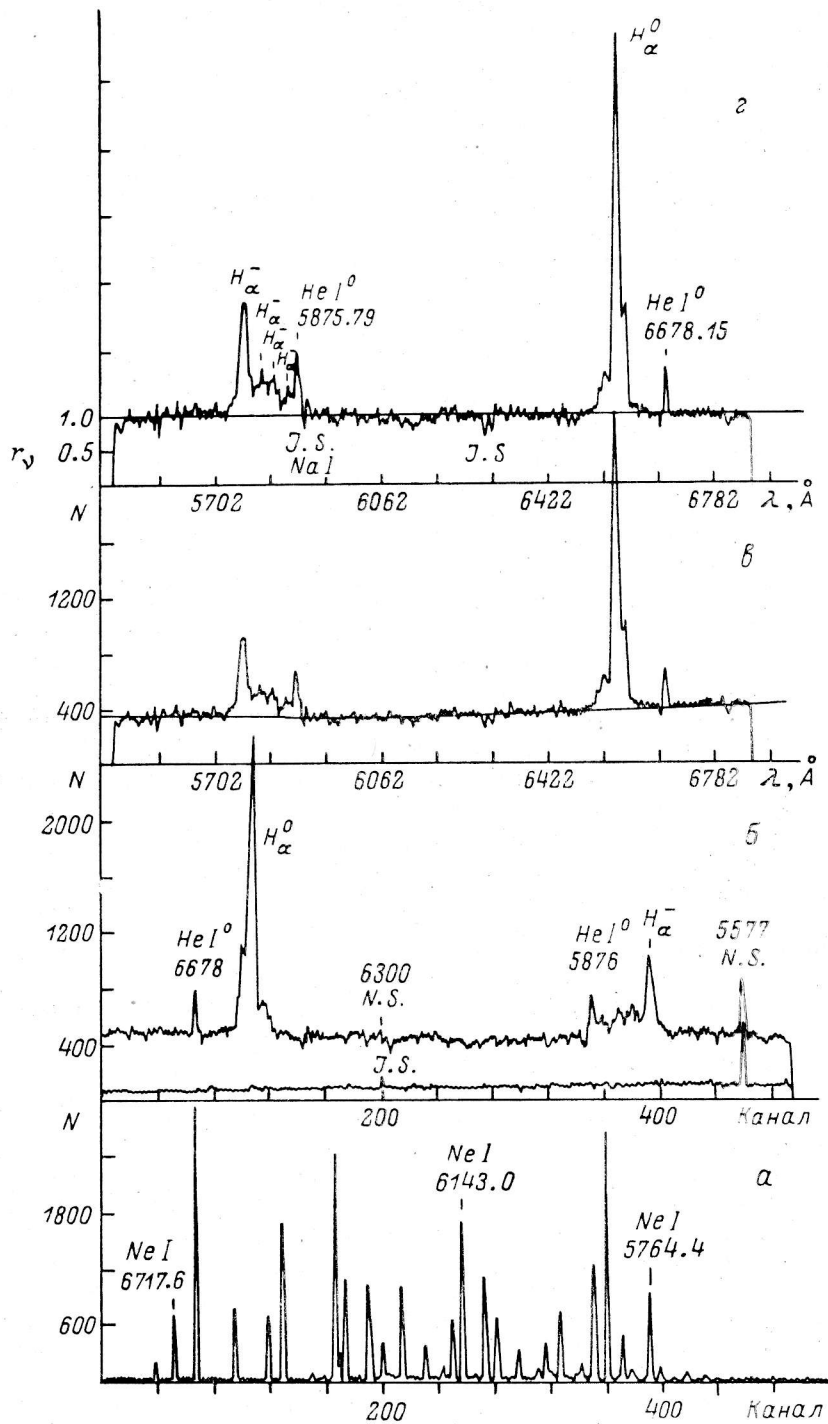


Рис. 2. Некоторые этапы методики обработки сканов SS 433 (22–23.07.81, $D=100 \text{ \AA/мм}$).

a — спектр сравнения в области $\lambda \approx 5430\text{--}6830 \text{ \AA}$; *N* — интенсивность (количество фотоэлектронов на канал); *b* — спектр ночного неба (нижняя кривая) и спектр SS 433 (верхняя); оба спектра представлены в каналах; *в* — фрагмент спектра SS 433, приведенного на рис. 2, *б*, после вычитания спектра ночного неба и перехода к шкале длин волн ($\lambda \approx 5460\text{--}6880 \text{ \AA}$); плавная кривая представляет собой уровень непрерывного спектра, проведенный автоматически ЭВМ; спектр записан в обратном направлении; *г* — спектр SS 433, нормированный к единице непрерывного спектра и записанный в остаточных интенсивностях r_v .

Применяемый алгоритм коротко можно объяснить так: делается предположение, что первая табличная длина волны спектра сравнения соответствует первой линии спектра сравнения, вычисляется дисперсия по двум первым длинам волн и положениям линий в спектре сравнения. Если сразу находится дисперсия, попадающая в допуски на ожидаемую, то процесс отождествления продолжается, при этом критерием верности отождествления является следующий параметр — число отождествленных линий. Если этот параметр превзойден, то отождествление считается верным. На практике этот параметр надо по возможности увеличивать для уменьшения вероятности ложных отождествлений, а число анализируемых линий задавать $\sim 10-15$.

При сплайновой интерполяции [20], например, точность построения дисперсионной кривой полностью определяется ошибками определения положений линий спектра сравнения. На дисплее (или графопостроителе) после построения дисперсионной кривой для контроля высвечивается кривая дисперсии (рис. 1, б), которая позволяет контролировать верность построения дисперсионной кривой. Если дисперсионная кривая посчитана неверно, то кривая дисперсии будет иметь волны или совсем другой вид. При построении дисперсионной кривой методом наименьших квадратов (в нашем случае с полиномом третьей степени) значение невязок построения ДК находится по формуле

$$\varepsilon_{\lambda_i} = \lambda_{\text{выч}} - \lambda_0 = ai^3 + bi^2 + ci + n - \lambda_0, \quad i = k_1, k_2, \dots, k_m,$$

где $\lambda_{\text{выч}}$ — вычисленное значение длины волны, соответствующее помеченному номеру отсчета k -й реперной линии спектра сравнения; λ_0 — заданное значение длины волны k -й реперной линии, a, b, c, n — коэффициенты дисперсионной кривой, полученные методом наименьших квадратов. Практика применения подобной методики показывает, что обычно среднее значение величин невязок $\leq 0.5 \text{ \AA}$, что при дисперсии 100 \AA/мм и $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ составляет $\leq 20-25 \text{ км/с}$.

В связи с тем что дисперсия вдоль спектра не является равномерной, необходимо приводить все спектры к одной равномерной шкале длин волн. Эта процедура (линеаризация спектра объекта и фона) может осуществляться также несколькими способами, например:

- а) линейной интерполяцией между каналами как по длине волны, так и по интенсивности;
- б) сплайновой интерполяцией между каналами как по длине волны, так и по интенсивности спектра (с интегрированием) [5, 20].

После приведения к единой шкале длин волн спектров объекта и фона можно приступить к вычитанию спектра ночного неба (по желанию для предварительной оценки характера спектра вычитать фон ночного неба можно и в каналах).

Сканы в длинах волн можно суммировать для повышения статистической точности спектров и осуществлять любые другие необходимые операции.

Проведение непрерывного спектра. Основная трудность, встречающаяся при традиционной обработке спектров звездных объектов, — проведение уровня непрерывного спектра. Если для спектров звезд ранних спектральных классов эта процедура с той или иной степенью точности поддается полной автоматизации [8], то для звезд поздних спектральных классов или объектов со сложным (эмиссионно-абсорбционным) или быстропеременным спектром процесс проведения уровня континуума полностью автоматизировать не всегда удается. Одно из необходимых в таком случае решений этой проблемы — включение в обрабатывающий комплекс средств взаимодействия экспериментатора и ЭВМ в режиме диалога [10]. Астроном, используя опыт и интуицию, подсказывает ЭВМ, как и через какие точки должен проходить уровень континуума. Для реализации такого режима нами были включены в систему обработки средства быстрой графической визуализации информации с обратной связью: графический дисплей и планшетный графопостроитель с соответствующим математическим обеспечением.

Задача автоматизации проведения непрерывного спектра решается легко, если в процессе обработки спектральной информации на ЭВМ астроном имеет возможность указать точки, через которые, по его мнению, должен проходить континуум. В рамках СИПРАНа были реализованы средства пометки избран-

ных точек на экране дисплея ЭПГ-СМ или на рисунке спектра на планшетном графопостроителе, точек, принадлежащих непрерывному спектру объекта. Астроном с помощью этих средств отмечает нужные точки континуума, если уровень непрерывного спектра, проведенного автоматически, в той или иной мере его не удовлетворяет, или исправляет только несколько точек, или дает согласие на верность проведения континуума. Если астроном сам задал точки континуума, через которые следует проводить непрерывный спектр, то эти точки используются ЭВМ в качестве входных данных для аппроксимации непрерывного спектра методом наименьших квадратов кривыми первого, второго или третьего порядков (по выбору) либо таким видом аппроксимации (также по желанию астронома), как кубические сплайны [20]. Вычисленный уровень континуума и исходный спектр выводятся на экран дисплея или разрисовываются на планшетном графопостроителе. Если полученная кривая не удовлетворяет исследователя, то он может повторить операцию проведения континуума вновь, пока не получит удовлетворительный результат.

При ручном проведении континуума астроном, глядя на обрабатываемый скан, выделяет участки спектра достаточно гладкие (без линий) на основании своего опыта и интуиции. Затем через выбранные участки проводит гладкую кривую. Задача автоматического проведения континуума состоит в том, чтобы формализовать по мере возможности этот алгоритм. Для этого в каждой точке спектра вычисляется значение функции t_i :

$$t_i = \frac{1}{n} \sum_{j=i-\frac{n}{2}}^{i+\frac{n}{2}} (y_j - a_i)^2,$$

где i — номер канала; n — некий линейный размер по оси абсцисс, который должен превосходить ширины линий; y_i — значение спектра; a_i — простое среднее значение или значение полинома, проведенного через окрестности i -й точки методом наименьших квадратов.

В тех точках спектра, где отсутствуют контрастные спектральные линии, значения t_i будут малы. После вычисления t_i необходимо выбрать N точек в спектре, по возможности равномерно распределенных по всему скану, и провести через них гладкую кривую. Для этого используется следующая процедура: берется минимум t_i , запоминаются значения соответствующего узла, окрестности узла удаляются из дальнейшего рассмотрения, и это действие повторяется N раз. Таким образом, мы имеем N узлов $(x_1y_1; x_2y_2; \dots; x_Ny_N)$. Если N велико, а спектр богат линиями, то некоторые из узлов могут оказаться ложными. Из соображений гладкости континуума ложные узлы отбрасываются, а через оставшиеся проводится гладкая кривая. Метод проведения кривой по желанию выбирает сам астроном: сплайновая интерполяция [20] или квадратичная интерполяция по методу наименьших квадратов (или полином нужной степени). Так как этот алгоритм требует настройки (из-за вариаций параметров), то его целесообразно применять при обработке набора однородных спектров (в одной спектральной области), как, например, в задаче исследования спектральной переменности. Тогда время, затраченное на настройку программы и подбор необходимых переменных параметров в программе, многократно окупается.

Как было описано выше, возможны полуавтоматические алгоритмы проведения уровня непрерывного спектра, например автоматический выбор узлов и ручная их коррекция в случае необходимости или ручной выбор $n < N$ узлов, а остальная часть работы осуществляется автоматически. Опыт использования этих алгоритмов показал их высокие эксплуатационные качества.

После завершения процедуры проведения уровня непрерывного спектра происходит перевод интенсивностей в остаточные интенсивности $r_i = J_i/J_i^c$, где J_i — интенсивность спектра в некоторой точке i ; J_i^c — интенсивность уровня непрерывного спектра в этой же точке. Результат этой работы может быть задокументирован на графопостроителе или на магнитной ленте. Пример визуализации участка оптического спектра рентгеновского источника SS 433

с автоматической разметкой предполагаемого уровня непрерывного спектра, отождествлением линий звезды и стандартных линий спектра сравнения, а также спектра, переведенного в остаточные интенсивности, приведен на рис. 2.

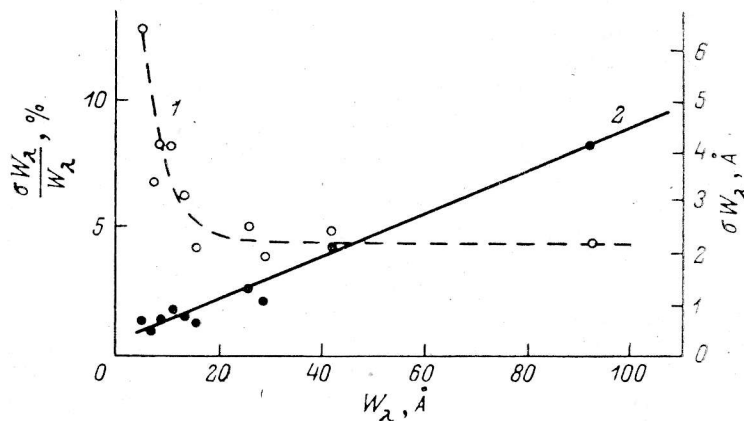


Рис. 3. Зависимость точности определения эквивалентных ширин $\sigma(W_\lambda)$ эмиссионных линий SS 433 от величины W_λ .

Ошибки найдены из результатов обработки сканов, полученных летом 1981 г. с телевизионным сканером в первичном фокусе БТА при дисперсии $\sim 400 \text{ \AA}/\text{мм}$. 1 — $\frac{\sigma W_\lambda}{W_\lambda}$; 2 — $\sigma W_\lambda \text{ \AA}$.

Определение параметров спектральных линий. Используя средства дисплейной обслуживающей системы, а именно бегающую точку, астроном помечает начало левого и конец правого крыльев линии с уровнем непрерывного спектра и передает эту информацию в ЭВМ СМ-4. Возможно и автоматическое выделение линий в спектре объекта точно так же, как и в спектре сравнения. После выполнения этой процедуры машина вычисляет параметры спектральных линий:

- эквивалентную ширину (методом сплайн-интегрирования)

$$W_\lambda = \sum_{i=i_n}^{i_k} \Delta\lambda (1 - r_i),$$

где i_n, i_k — номера точек «начала» и «конца» линий; r_i — остаточная интенсивность в i -й точке линии; $\Delta\lambda$ — шаг линейаризации спектра, \AA ;

— полуширину линии на половине уровня минимальной (в случае абсорбционной) или максимальной (в случае эмиссионной) остаточной интенсивности $\Delta\lambda (1/2)$;

— длину волны линии в точке минимальной (максимальной) интенсивности $\lambda_{\text{взм}}$;

— ширину линии $\Delta\lambda$ на 10 уровнях остаточной интенсивности и длину волны середины линии на 10 уровнях остаточной интенсивности, вычисляемой по формуле

$$r_{\lambda k} = \left(\frac{1 - r_0}{10} \right) k + r_0,$$

где $k=1, 2, \dots, 10$.

Последнее делается для обнаружения возможной асимметрии спектральных линий. Кроме того, для определения численных значений ширины и асимметрии спектральных линий считаются второй и третий моменты, соответственно:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\lambda_{\text{эф}} - \lambda_i)^2 r_i}{\sum_{i=1}^N r_i};$$

$$EX = \frac{\sum_{i=1}^N (\lambda_{\text{эф}} - \lambda_i)^3 r_i}{\sum_{i=1}^N r_i},$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ — эффективная длина волны.

После вычисления этих параметров на АЦПУ производится их распечатка.

Большое внимание при создании вычислительных программ было уделено их тестированию (как ручными вычислениями, так и специальными тестами). Точности измерения различных фотометрических параметров спектральных линий SS 433 на сканах, полученных в первичном фокусе БТА с помощью теле-

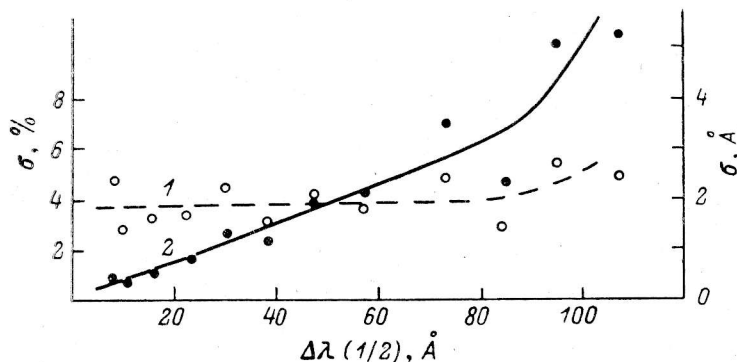


Рис. 4. Зависимость точности определения полуширин σ ($\Delta\lambda 1/2$) эмиссионных линий от значения $\Delta\lambda (1/2)$.

Ошибки найдены по материалам обработки сканов SS 433, полученных летом 1981 г. с помощью телевизионного сканера в первичном фокусе БТА при дисперсии $\sim 100 \text{ Å/мм}$. 1 — $\sigma, \%$, 2 — $\sigma, \text{Å}$.

визионного сканера (дисперсия 100 Å/мм), представлены на рис. 3—5. По этим кривым можно оценить ошибки определения различных фотометрических параметров в зависимости от величины последних.

Заключение. Резюмируя вышесказанное, можно подчеркнуть, что цифровая форма наблюдательной информации, а также наличие в используемой системе графического дисплея открывает для исследователей ряд возможностей и удобств: визуализация спектра объекта, спектра фона неба и их разности во время наблюдения в процессе накопления на экране дисплея обеспечивает немедленную обратную связь с наблюдателем, что позволяет корректировать процесс наблюдений; стандартная форма дает возможность дублировать материал, доступна одновременно многим

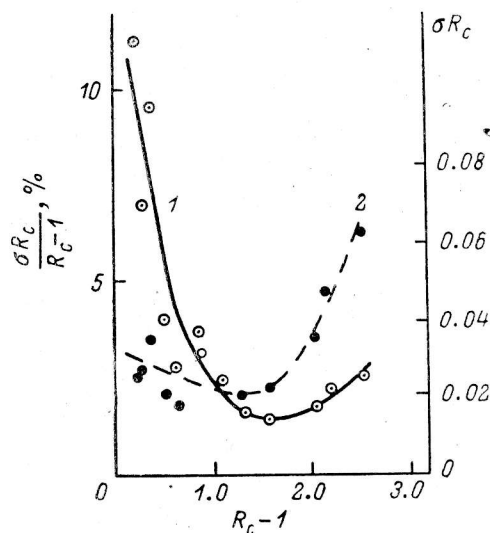


Рис. 5. Зависимость точности определения остаточной интенсивности $\sigma(R_c)$ эмиссионных линий SS 433 от значения $R_c - 1$.

Ошибки найдены по материалам обработки сканов SS 433, полученных летом 1981 г. при помощи телевизионного сканера в первичном фокусе БТА с дисперсией $\sim 100 \text{ Å/мм}$. 1 — $\sigma R_c / (R_c - 1)$; 2 — σR_c .

наблюдателям и позволяет создавать для хранения информации и ее систематизации банки данных и т. д.

На основе новых аппаратных возможностей сканера БТА [4] и созданного языка программирования СИПРАН [5] написан, отлажен и введен в практику блок программ автоматической обработки звездных спектров, созданы программы, управляющие комплексом и позволяющие измерять ряд технических характеристик системы.

В заключение выражаем глубокую благодарность коллективу аппаратной БТА и его руководителю С. В. Драбеку за хорошую работу всего комплекса, на котором была проделана данная работа, и сотрудникам САО Л. В. Вяткиной и Л. В. Алексеевой за большую помощь в оформлении статьи.

Литература

1. О нестабильности прецессионного периода SS 433 / И. М. Копылов, Р. Н. Кумайгородская, В. Б. Небелицкий и др. — Письма в АЖ, 1982, 8, с. 461—466.
2. Копылов И. М., Кумайгородская Р. Н., Сомова Т. А. Спектр SS 433 в стадии вспышечной активности (шоль 1980). — Астрон. журн., 1985, 62, с. 323—338.
3. О быстрой спектральной и фотометрической переменности SS 433 / И. М. Копылов, Р. Н. Кумайгородская, Н. Н. Сомов и др. — Астрон. журн., 1985, 62.
4. Двухпроцессорный аппаратно-программный комплекс — сканер БТА. I. Новые возможности и описание работы / С. В. Драбек, И. М. Копылов, Н. Н. Сомов, Т. А. Сомова. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1985, 22, с. 64—72.
5. Сомов Н. Н. Двухпроцессорный аппаратно-программный комплекс — сканер БТА. II. СИПРАН — специализированный язык программирования. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1985, 22, с. 73—76.
6. Копылов И. М., Сомов Н. Н., Сомова Т. А. Методика получения и обработки сканерных спектров SS 433. — В кн.: Новая техника в астрономии. Л.: Наука, 1984, 7, с. 5—9.
7. Коровяковская А. А., Коровяковский Ю. П., Ченцов Е. Л. Автоматизированная обработка высокодисперсионных спектрограмм O—A-звезд с помощью ЭВМ. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1975, 7, с. 156—162.
8. Обслуживающая дисплейная система / А. А. Коровяковская, Л. С. Мережина, Н. П. Хоруижкая, В. С. Шергин. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1980, 12, с. 169—174.
9. Коровяковская А. А., Коровяковский Ю. П. Автоматическая обработка спектров небесных объектов. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1983, 17, с. 47—58.
10. Афанасьев В. Л., Щербановский А. Л. Экспрессная обработка спектрограмм внегалактических объектов. I. Предварительная обработка. — Сообщ. САО, 1977, вып. 16, с. 25—34.
11. Шаповалова А. И., Щербановский А. Л. Экспрессная обработка спектрограмм внегалактических объектов. II. — Сообщ. САО, 1978, вып. 22, с. 49—60.
12. Афанасьев В. Л. Редукция масштабных искажений спектрограмм, полученных с электронно-оптическим преобразователем. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1979, 11, с. 51—55.
13. Антропов Ю. Ф. Полуавтоматический оцифрователь графиков. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1978, 10, с. 70—74.
14. Цифровой метод обработки спектросенситограмм для исследования астрономических эмульсий / Л. Г. Антропова, В. С. Рылов, М. Ф. Шабанов, А. Ч. Узденов. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1976, 8, с. 64—68.
15. Фотометрический комплекс САО для лабораторной обработки астрономических данных / О. С. Буренкова, В. П. Горшков, В. М. Гуриш и др. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1984, 18, с. 105—110.
16. Буренкова О. С., Коровяковская А. А., Назаренко И. И. Система сканирования предварительной обработки спектров на фотометрическом комплексе САО АН СССР. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1982, 16, с. 108—115.
17. Спектральные наблюдения квазаров / В. Б. Небелицкий, Д. А. Варшалович, С. А. Левшаков, А. Ф. Фоменко. — Оптика и спектроскопия, 1983, 54, вып. 5, с. 763—765.
18. Robertson J. G. IPCS observations of faint object spectra: optimization of the signal-to-noise ratio. — AAO UM, 1983, N 11, 23 p.
19. Телевизионный 1000-канальный счетчик фотонов для регистрации сверхслабых световых потоков / И. И. Балег, С. В. Маркелов, В. Б. Небелицкий и др. — Автометрия, 1979, 4, с. 22—29.
20. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулдер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 279 с.
21. Hill G. INTER, an effective interpolation subroutine. — Publ. Dom. Astrophys. Obs., 1982, 16, N 6, p. 65—70.

Поступила в редакцию 10.12.84