

СИСТЕМА СКАНИРОВАНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СПЕКТРОВ НА ФОТОМЕТРИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ САО АН СССР

О. С. Буренкова, А. А. Коровяковская, И. И. Назаренко

Создано математическое обеспечение для фотометрического комплекса САО, позволяющее сканировать спектры на автоматическом микроденситометре АМД-1, буферизовать и визуализировать оцифрованную информацию, осуществлять перевод плотностей в интенсивности, остаточные интенсивности, номеров отсчетов — в длины волн.

For the photometric complex of SAO software is prepared which allows the scanning of spectra with the automatic microdensitometer AMD-1, storage in the buffer memory and visualization of digital information, to carry out the transition of densities into intensities and residual intensities, numbers of counts into wavelengths.

Введение. В общем потоке астрофизической информации, получаемой с БТА, значительную роль составляет спектральная. Для ускорения ее обработки необходимо применение высокоскоростных устройств съема, оцифровки и обработки информации. В САО АН СССР для этих целей используется фотометрический комплекс, созданный на основе отечественного двухкоординатного микроденситометра АМД-1 [1]. Для этого комплекса написано специальное математическое обеспечение, которое позволяет обрабатывать одномерные и двумерные фотоизображения.

Нами создана система сканирования и предварительной обработки спектральной информации, которая является частью этого математического обеспечения.

В системе используются две мини-ЭВМ, входящие в состав фотометрического комплекса и сопряженные стандартным интерфейсом. Одна из них, ЭВМ М-400, управляет работой АМД-1 и комплекса в целом, выполняет необходимые вычисления. Вторая, ЭВМ Э-100И, выполняет функции процессора ввода—вывода. Кроме того, в работе системы с целью повышения производительности комплекса задействована третья мини-ЭВМ — СМ-4, на которой производится подготовка и счет промежуточных данных.

Нестандартность компоновки вычислительных средств позволила создавать системы с более широкими возможностями визуализации, документирования и обработки информации, чем поставляемые вместе с АМД-1 и ЭВМ М-400 стандартные программы. Одновременно возникла необходимость замены стандартного драйвера АМД-1 (программы, управляющей сканированием на АМД-1) на ряд других, меньшего объема, но более специализированных и лучше использующих возможности АМД-1 для повышения позиционной и фотометрической точности сканирования. Измеренные автоматическим микроденситометром и оцифрованные аналого-цифровым преобразователем плотности изображения на фотоэмульсии считываются в оперативную память ЭВМ М-400. Дискретность прибора по координатам составляет 5 мкм, по плотности — 0.01 D . Диапазон измеряемых плотностей и перемещений по координатам составляет 0—5 D и 160×180 мм соответственно. Скорость движения каретки может достигать 6 мм/с, скорость снятия отсчетов — до 1000 в секунду.

Для визуализации оцифрованной и обработанной информации нами был выбран графоопстроитель «Вектор», который обладает достаточно высокой пози-

ционной точностью и не имеет практически ограничений на длину выводимого участка спектра при оптимальном использовании поля графопостроителя.

В данной статье описан процесс сканирования и предварительной обработки спектральной информации на фотометрическом комплексе.

Структура системы. В системе математического обеспечения обработки спектров реализован диалоговый режим работы экспериментатора с фотометрическим комплексом. Экспериментатор в процессе работы с комплексом выбирает режим работы системы, вводные—выводные устройства, режим сканирования, этапы обработки и визуализации и т. д.

Функционально система разделена на три части. В первой части реализованы процедуры сканирования, буферизации и визуализации исходной информации. Эти операции можно производить с любой информацией, полученной на фотоэмульсии: со спектром объекта, спектром сравнения, калибровочными шкалами, панорамными изображениями.

После визуализации оцифрованной информации на графопостроителе «Вектор» экспериментатор отмечает на графике спектра объекта уровень непрерывного спектра, на графике спектра сравнения — эталонные линии и их длины волн, по графикам фотометрических разрезов калибровочных шкалок экспериментатором готовятся данные для построения характеристической кривой.

Во второй части системы производится аппроксимация уровня непрерывного спектра и построение характеристической и дисперсионной кривых. Все операции второй части производятся на ЭВМ СМ-4 и не занимают время на управляющей машине комплекса М-400.

В третьей части осуществляется перевод оцифрованных на АД-1 плотностей в интенсивности, производится вычисление остаточных интенсивностей, перевод номеров отсчетов в длины волн и визуализация промежуточных и окончательных результатов.

Такая организация работы позволила получать предварительные результаты обработки спектральной информации на фотометрическом комплексе с минимальной затратой времени комплекса на вычислительные процедуры. На блок-схеме (рис. 1) представлена организация работы системы предварительной обработки спектров. Поясним ее в тексте.

Сканирование и визуализация. В системе предусмотрено сканирование как прямолинейных, так и искривленных спектров (например, ЭОП-ных). Сканирование фотоизображений производится с шагом дискретизации 5 мкм. Максимальная длина сканируемого участка определяется по формуле $5N \cdot 5000$ мкм, где $5N$ — шаг дискретизации, 5000 — максимальное количество отсчетов, которое определяется объемом оперативной памяти ЭВМ М-400 (28К). При увеличении оперативной памяти возможно увеличение длины сканируемого участка. Шаг дискретизации, ориентация спектра по осям предметного стола АД-1 и длина сканируемого участка задаются экспериментатором по ее запросу.

Сканирование криволинейных спектров (частный случай прямая $y=ax+b$) осуществляется по отрезкам ломаной линии, максимально приближенной к форме спектра. Координаты узлов ломаной линии, предварительно определенные в ручном режиме на АД-1, задаются экспериментатором с пульта ЭВМ.

Поскольку точность оцифровки измеренной плотности составляет $0.01 D$, график плотности при однократном сканировании представляет собой ступенчатую функцию.

Однако система позволяет сканировать один и тот же участок прямолинейного спектра многократно. Возврат каретки АД-1 после сканирования в исходную точку осуществляется с точностью до 1 дискреты (5 мкм). При повторном сканировании растр может быть несколько сдвинут относительно нуля, следовательно, в растр попадет несколько иное количество зерен фотоэмульсии. Оцифрованные отсчеты плотности при k -м сканировании складываются с предыдущими отсчетами. При k -кратном сканировании результирующая плотность определяется в виде

$$D = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m D_k.$$

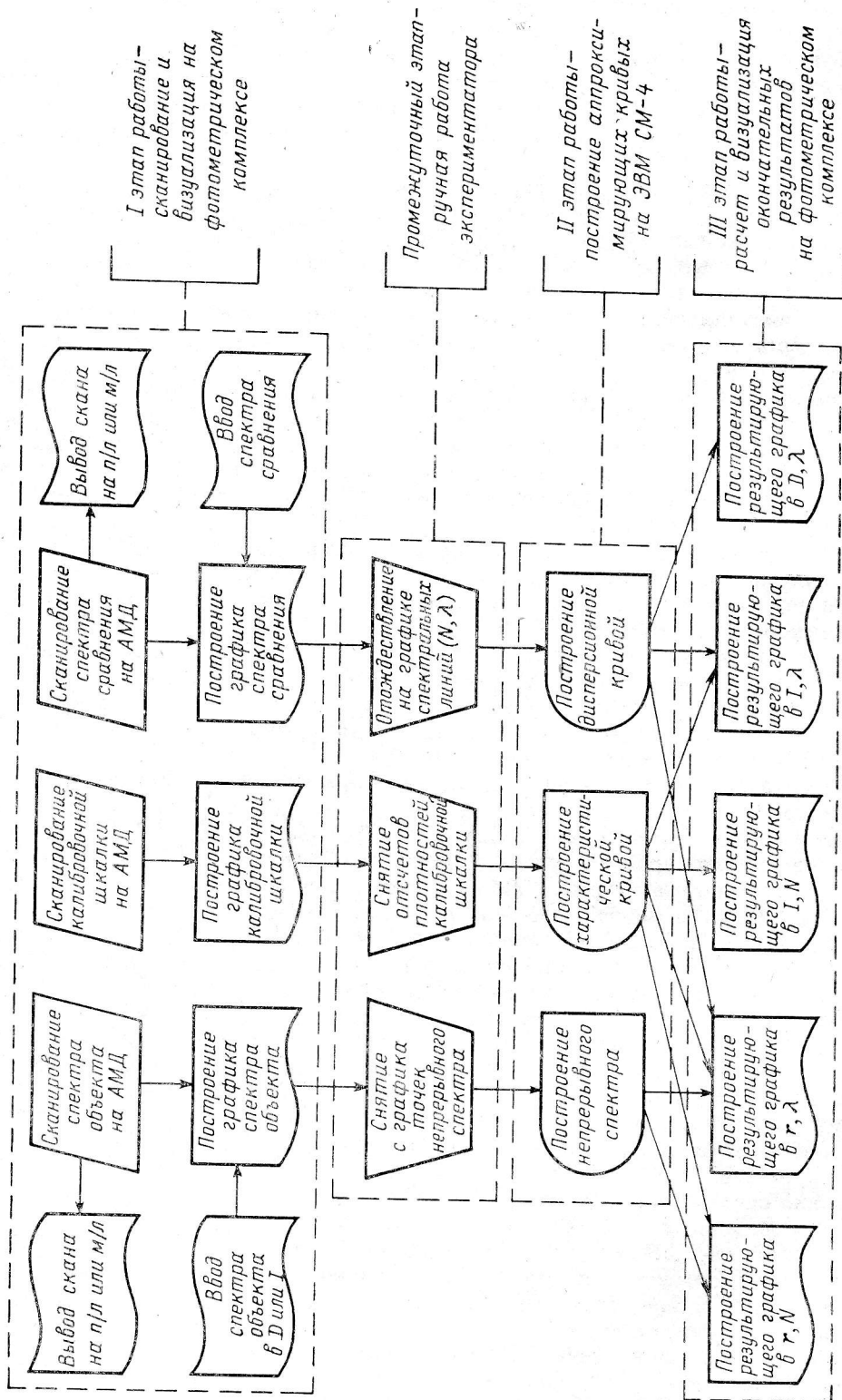


Рис. 1. Функциональная блок-схема организации работы системы.

Кроме того, при многократном сканировании усредняются шумы фотометрического тракта АМД-1.

После сканирования информация из оперативной памяти ЭВМ выводится при необходимости на графопостроитель «Вектор». В системе предусмотрено масштабирование информации при ее визуализации. Масштаб по X , Y ($X > 0$, $Y > 0$) задается экспериментатором по запросу ЭВМ. Кроме того, система позволяет экспериментатору распределять рабочее поле графопостроителя в процессе работы с системой. На одном листе миллиметровки (80×60 см), на котором производится разрисовка оцифрованной информации, экспериментатор может визуализировать с соблюдением нуля-пункта спектр объекта, спектр сравнения, спектр звезды сравнения и т. д.

Максимальное число отсчетов, которое может поместиться в одну строку графопостроителя по координате X , составляет по $3200/M_x$, где M_x — масштаб по абсциссе. Если график не помещается в одной строке, то система делит информацию на части, располагая каждую последующую строку над предыдущей. Местоположение строки экспериментатор может изменить по своему усмотрению. Первая точка k -й строки является $[(k-1)n+1]$ -й точкой спектра.

После визуализации на графопостроителе система по желанию пользователя документирует информацию с сохранением масштаба по плотности на носителе информации, которым может являться перфолента или магнитная лента.

На этом один цикл первой части системы заканчивается и ЭВМ запрашивает режим дальнейшей работы. В зависимости от режима работы, заданного экспериментатором, информация, предназначенная для визуализации, может быть не только измерена и оцифрована на АМД-1, но и введена с носителя информации.

Подготовка данных для системы. После визуализации и документирования просканированной спектральной информации на АМД-1 экспериментатор должен на графике спектра объекта, полученном на графопостроителе, отметить уровень непрерывного спектра, поставив в соответствие значению плотности континуума номер отсчета в указанных точках. Эта операция необходима в том случае, если в дальнейшем будет необходим расчет остаточных интенсивностей. Заданная таким образом табличная функция непрерывного спектра будет аппроксимирована в системе аналитической функцией. Для аппроксимации дисперсионной кривой экспериментатор должен на графике спектра сравнения, полученного на графопостроителе, отождествить эталонные линии и составить табличную функцию зависимости длины волны спектральной линии от номеров отсчета.

Аппроксимация табличных функций. В системе предусмотрено несколько видов аппроксимации табличных функций, заданных экспериментатором, аналитическими функциями: аппроксимация уровня непрерывного спектра или дисперсионной кривой одной кривой второго порядка, параболическими сплайнами, набором кривых второго порядка. Экспериментатор имеет возможность находить значение функции (плотности, длины волны) в данной точке с помощью линейной интерполяции между отмеченными точками.

Аппроксимация проводится следующим образом. Экспериментатор вызывает в оперативную память ЭВМ программу, соответствующую выбранному виду аппроксимации, с помощью буквенно-цифрового дисплея задает программе пары точек табличных функций уровня континуума или дисперсионной кривой. После ввода данных возможна их коррекция. Уровень непрерывного спектра можно задавать с учетом нуля (фона). При аппроксимации табличной функции одной кривой второго порядка программа составляет избыточную систему условных уравнений, число которых равно числу заданных пар точек. Затем методом наименьших квадратов определяется система трех уравнений с тремя неизвестными, после решения которой получаем коэффициенты аппроксимационной кривой второго порядка. Далее считаются невязки между значениями функции (плотности, длины волны), заданной экспериментатором и вычисленной по аппроксимационной кривой. Значения невязок и коэффициентов выводятся на печать.

При аппроксимации набором кривых второго порядка составляется N систем избыточных условных уравнений. В каждой системе 5 уравнений. Системы составляются так, чтобы два последних условных уравнения в предыдущей си-

системе являлись двумя первыми уравнениями в последующей системе. Эти системы уравнений приводятся методом наименьших квадратов к системам трех уравнений с тремя неизвестными, и после решения систем получаются коэффициенты для N кривых второго порядка, где N определяется по формуле

$$N = \text{int} [(M - 1)/3 + 0.67],$$

(int — целая часть числа, M — количество точек). Сопряжение кривых производится нахождением средневзвешенных значений функции (плотности, длины волны) для каждого отсчета между общими точками в системах условных уравнений таким образом, чтобы не было скачка функции в окрестностях этих точек. После завершения аппроксимации считаются невязки между отмеченными и вычисленными по аппроксимационной кривой значениями функций.

При аппроксимации параболическими сплайнами [2] парабола проводится через каждые три точки, т. е. решается система из M уравнений, где M на единицу меньше количества заданных пар точек. По определению невязки между экспериментальными значениями функции и вычисленными по аппроксимационной кривой равны нулю.

Исследование значений невязок по всем предусмотренным видам аппроксимации позволили сделать следующие выводы. Аппроксимация уровня непрерывного спектра одной кривой второго порядка для получения удовлетворительной точности требует, чтобы значения функции задавались с почти равным шагом по аргументу и чтобы функция меняла знак производной не более одного раза (один перегиб). Длина просканированного участка спектра (количество отсчетов) не должна быть слишком большой. Из этого следует, что данный вид аппроксимации имеет ограниченное применение. Все указанные ограничения снимаются при аппроксимации набором кривых второго порядка. Практика показала, что невязки при аппроксимации дисперсионной кривой в этом случае не превышают 0.4 шага дискретизации функции. Для дисперсии на пластинке 10 Å/мм и шага дискретизации 10 мкм величина невязки не превышала 0.04 Å. Для повышения точности следует чаще задавать точки в тех местах спектра, где имеет место большая скорость изменения производной аппроксимируемой функции, т. е. на крутых перегибах. В таблице приведены значения невязок,

λ_0	λ	$\Delta\lambda$	λ_0	λ	$\Delta\lambda$
4254.330	4254.324	-0.006	4337.046	4337.075	0.029
4282.403	4282.437	0.034	4352.730	4352.753	0.023
4299.234	4299.194	-0.040	4365.740	4365.750	0.010
4307.900	4307.893	-0.007	4369.770	4369.740	-0.030
4315.080	4315.077	-0.003	4391.990	4391.950	-0.040
4325.760	4325.723	-0.037			

полученных при аппроксимации дисперсионной кривой набором кривых второго порядка. В первом столбце значения длин волн, заданных экспериментатором (λ_0), во втором — вычисленные системой (λ), в третьем — значения невязок ($\Delta\lambda$). Дисперсия спектра ~ 10 Å/мм.

Во всех описанных случаях аппроксимации табличных функций коэффициенты аппроксимационной функции выводятся на перфоленту, которая используется в третьей части системы обработки спектров.

Все процедуры аппроксимации и подготовки данных проводятся на ЭВМ СМ-4, входящей в комплекс, но не соединенной с ним линией связи. На этом же этапе работы для системы готовится характеристическая кривая. Построение ее предусмотрено двумя способами. В первом случае экспериментатор составляет по построенной им вручную характеристической кривой табличную функцию зависимости плотности от логарифма интенсивности так, чтобы была возможна линейная интерполяция между точками.

Во втором случае характеристическая кривая строится автоматически. В ЭВМ задаются для нескольких фотометрических разрезов калибровочной

шкалки значения плотностей ступеней и соответствующие им значения логарифмов интенсивностей. Программа осуществляет параллельный сдвиг этих разрезов по $\lg I$ (I — интенсивность) в одну характеристическую кривую, затем для улучшения статистики она может быть дополнена точками, полученными путем усреднения экспериментальной кривой по 2 и 3 точкам, т. е. добавляет $5/6 M$ точек, где M — число точек в экспериментальной кривой. Полученная

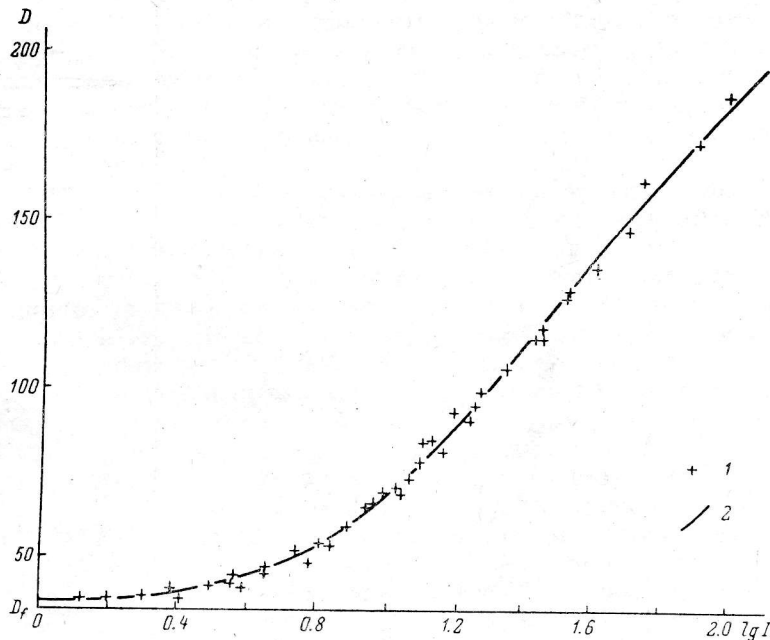


Рис. 2. Пример автоматического построения характеристической кривой.

1 — экспериментальные точки после совмещения пяти фотометрических разрезов калибровочной шкалки; 2 — аппроксимированная характеристическая кривая.

таким образом кривая аппроксимируется полиномом, использующим плотность Вакера [3],

$$Y = A + BQ + CQ^2 + DQ^3,$$

где

$$Q = \log \frac{T_r}{1 - T_r}; \quad T_r = (1/10)^{D - D_f},$$

Y — логарифм интенсивности; D_f — плотность фона; D — плотность ступени. Коэффициенты A , B , C , D вычисляются методом наименьших квадратов. На рис. 2 приведен пример автоматического построения характеристической кривой описанным методом.

Как в первом, так и во втором случае значения $\lg I$ с шагом по плотности 0.01 D выдаются на печать и перфорацию в формате, предусматривающем дальнейшее использование их в системе.

Последний этап машинной обработки. Перфоленты с характеристической кривой, аппроксимированной дисперсионной кривой и аппроксимированным уровнем континуума используются в заключительной части работы системы для перевода плотностей в интенсивности, номеров отсчетов в длины волн, для вычисления остаточных интенсивностей. Спектральная информация, подлежащая обработке, в оцифрованном виде должна находиться на носителе информации.

По желанию экспериментатора конечный результат может быть выдан системой в виде графика функций: $D(N)$, $I(N)$, $D(\lambda)$, $I(\lambda)$, $r(N)$, $r(\lambda)$, где I — интенсивность; D — плотность; r — остаточная интенсивность; N — номер отсчета; λ — длина волны.

Работа экспериментатора с ЭВМ в заключительной части ведется в диалоговом режиме: система задает экспериментатору вопрос, ответ на который она

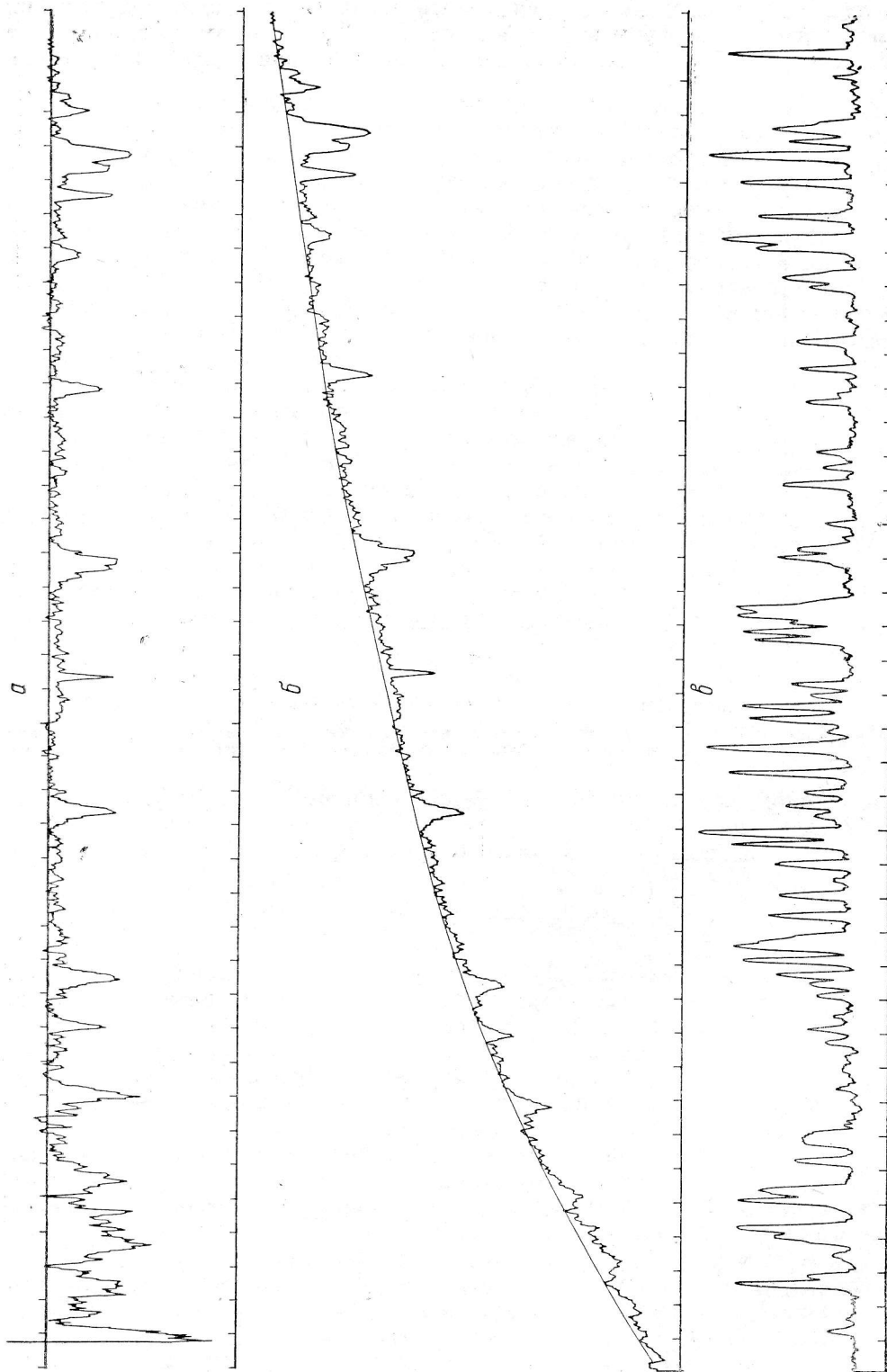


Рис. 3. Пример визуализации результатов работы системы на графопостроителе «Вектор» при обработке спектра Суг Х-1.

анализирует, и выполняет необходимые действия. Система выясняет, что является носителем информации (перфолента, магнитная лента), нужно ли вводить характеристическую кривую, аппроксимированный уровень непрерывного спектра, аппроксимированную дисперсионную кривую, какой вид аппроксимации, какой масштаб по абсциссе и ординате, где оптимально расположить информацию на рабочем поле графопостроителя и т. д.

В тех случаях, когда нужно получить информацию в зависимости от длины волны $[I(\lambda), D(\lambda), r(\lambda)]$, система требует поставить во вводящее устройство перфоленту с дисперсионной кривой и просит указать, какое количество англ-стрем должно содержаться в 1 см на графопостроителе. Экспериментатор может задать любое целое число, руководствуясь целями дальнейшего использования полученного материала.

Система не требует ввода характеристической кривой в том случае, если результат должен быть представлен в плотностях или вводимая оцифрованная спектральная информация получена на многоканальном счетчике фотонов.

Для получения графиков функций $r(\lambda)$, $r(N)$ система требует ввода аппроксимированного уровня непрерывного спектра. После ввода перфоленты, полученной во второй части работы системы, для каждого отсчета вычисляется уровень континуума и соответствующее значение остаточной интенсивности. Результаты проведения уровня непрерывного спектра системой можно вывести на графопостроитель вместе с исходной информацией. Результаты в виде графика выводятся на «Вектор» и, кроме того, по желанию экспериментатора, их можно документировать на перфоленте. На рис. 3 приведены результаты сканирования и предварительной обработки спектра оптического компонента рентгеновского источника Cug X-1, полученного в отделе физики и эволюции звезд исполнителями темы «Исследование рентгеновских источников» на ОЗСП БТА с дисперсией 28 Å/мм. Сканирование 16-мм спектра Cug X-1 и спектра сравнения (ЛПК) проводилось с шагом 10 мкм и щелью 40 × 500 мкм. Рис. 3, в представляет спектр сравнения, рис. 3, б — спектр Cug X-1 в плотностях с проведенным уровнем непрерывного спектра, рис. 3, а — спектр Cug X-1 в остаточных интенсивностях и длинах волн.

Заключение. Описанная система предварительной обработки спектральной информации позволяет экспериментатору избавиться от самой непроизводительной, рутинной части работы при обработке спектров. Она позволяет контролировать все этапы обработки и получать результаты в виде, удобном для дальнейшей традиционной обработки спектров. Следует отметить, что все процедуры при работе с системой может выполнять оператор, кроме процедур отметки уровня непрерывного спектра и эталонных линий спектра сравнения.

В заключение выражаем глубокую благодарность В. С. Шергину за создание программы, обеспечивающей прием и вывод информации из ЭВМ Э-100И на внешние устройства, И. М. Копылову за предоставленный спектральный материал для тестирования системы и обсуждения результатов, Л. В. Бычковой за участие в тестировании системы, Ю. П. Коровяковскому и Е. Л. Ченцову за обсуждение результатов.

Литература

1. Гришин М. П. Автоматическая обработка фотографических изображений с применением ЭВМ. Минск, «Наука и техника», 1976.
2. Стежкин С. В., Субботин Ю. Н. Сплайны в вычислительной математике. М., «Наука», 1976.
3. Marghal J. La spectrographie au C. D. C. A. — Journées d'études du C. D. C. A., Lanslebourg, 1977, D 1, p. 3—7.

Поступила в редакцию 06.04.81