

И. И. БАЛЕГА, С. В. МАРКЕЛОВ, В. Б. НЕБЕЛИЦКИЙ,  
Н. Н. СОМОВ, Т. А. СОМОВА, О. И. СПИРИДОНОВА,  
А. Ф. ФОМЕНКО, Л. П. ФОМЕНКО, Г. С. ЧЕПУРНЫХ

(Нижний Архыз, Ставропольский)

## ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ 1000-КАНАЛЬНЫЙ СЧЕТЧИК ФОТОНОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СВЕРХСЛАБЫХ СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ

Телевизионные методы регистрации слабых световых потоков находят все более широкое применение во многих областях науки и техники [1—3]. Это обусловлено возможностью телевизионных систем сочетать такие ценные качества, как высокая чувствительность, многоканальность и быстроедействие, с цифровой обработкой видеосигнала в реальном времени с помощью ЭВМ.

Применение цифровой телевизионной техники в астрономии стало особенно эффективным средством изучения спектров слабых объектов. В настоящее время известно несколько подобных систем, с успехом применяющихся зарубежными учеными для исследований спектров квазаров, спектров высокого разрешения и др. В качестве приемника света в них используется многокаскадный ЭОП (3—4 каскада), работающий в режиме регистрации одноэлектронных событий. Каждая вспышка сохраняется на люминофоре ЭОП в течение времени, сравнимого со временем кадровой развертки телевизионного устройства. Благодаря этому все фотоэлектроны регистрируются телевизионной системой, в которой используется диссектор [4] или плюмбикон [5]. Регистрация информации и ее накопление осуществляется ЭВМ. Эффективность таких систем при регистрации слабых световых потоков практически равна квантовой эффективности первого фотокатода ЭОП [6, 7]. Ниже приведено описание телевизионного 1000-канального счетчика фотонов для получения спектров слабых астрономических объектов, созданного в САО АН СССР.

На рис. 1 представлена блок-схема системы. Усилителем светового потока в установке является трехкаскадный ЭОП УМ-92. В качестве сканирующего светоприемного устройства в установке используется высокочувствительная передающая телевизионная трубка-суперкремникон, которая работает как пространственный регистратор и однокадровый буфер, запоминающий все сцинтилляции, возникающие на экране ЭОП за время кадра. Изображение с люминесцентного экрана ЭОП переносится на фотокатод телевизионной трубки с помощью объектива «Аврора». Управляющей ЭВМ в системе является мини-ЭВМ «Электроника-100И» («Э-100И»), которая также (совместно с внешним МОЗУ) выполняет функцию накопления и первичной обработки данных. Узлом отображения накапливаемой информации в системе служит устройство отображения графической и буквенно-цифровой информации УГД 43-1 [8, 9].

Сигнал, снимаемый с сопротивления нагрузки мишени, поступает на вход малошумящего предварительного усилителя (ПУ) с приведенным шумовым током 2 нА и затем усиливается и формируется стандартным видеоусилителем (ВУ) УВ-66. Далее видеосигнал направляется в видеоконтрольное устройство ВК-12 и устройство выборки и хранения (УВХ), являющееся буферным устройством между трактом усиления и АЦП. УВХ синхронизируется с частотой строчной развертки и осуществляет выборку и запоминание максимальной амплитуды видеосигнала в промежутках времени, когда сканируются участки мишени, несущие исследуемую спектральную информацию.

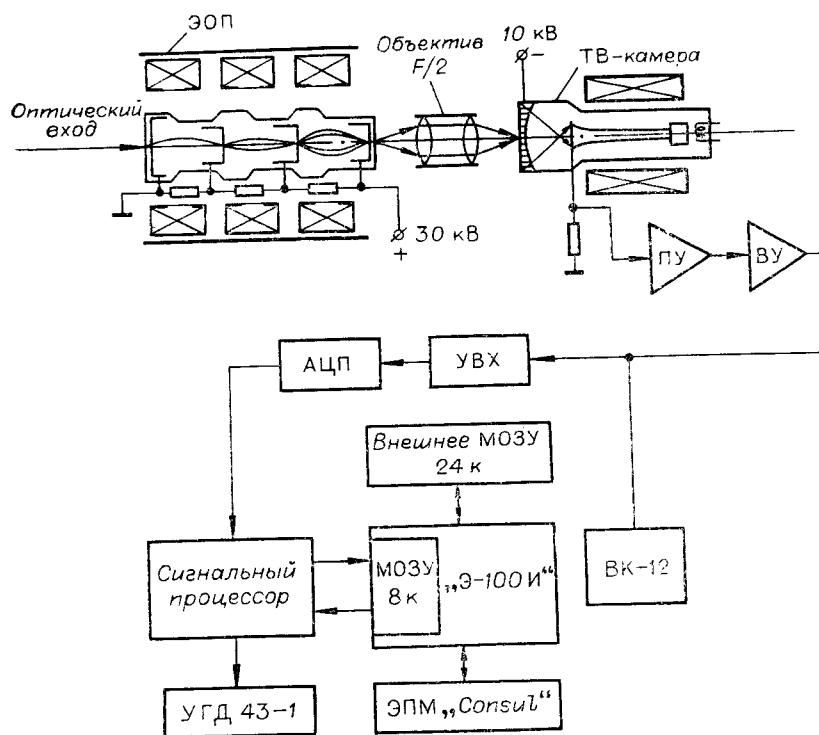


Рис. 1. Блок-схема телевизионного многоканального счетчика фотонов.

Особенностью спектрофотометрических исследований телевизионным методом является то, что используется сравнительно малая часть площади фотокатодов. На фотокатод ЭОП проецируется два спектра с коллинеарным направлением дисперсии (спектры объекта и неба или спектр лампы сравнения). При размерах рабочего поля на мишени суперкремникона  $10 \times 12,5$  мм информацию несут два участка размерами  $\sim 0,3 \times 12,5$  мм. Исследуемые спектры проецируются на фотокатод ЭОП так, чтобы направление дисперсии было перпендикулярно направлению строчной развертки суперкремникона. Мишень телевизионной трубки сканируется непрерывно электронным лучом с частотой 30 Гц при числе строк 512.

В реальных условиях эксперимента длительность времени выборки можно варьировать от 0,5 до 6 мкс. В полосе выборки информации запускается быстродействующий 8-разрядный АЦП, который, как и интерфейс программируемого канала, разработан в ИАиЭ СО АН СССР [10]. Коды с АЦП подаются в сигнальный процессор, который может работать в трех режимах: в аналоговом, «Счет фотонов 1» и «Счет фотонов 2».

Функциональная схема сигнального процессора (СП) приведена на рис. 2; опишем назначение элементов. Блок управления 3 предназначен для формирования сигналов, управляющих работой всех узлов СП и вводом данных в ЭВМ по каналу прямого доступа. Счетчик 6 является счетчиком текущей строки; дополнительный разряд счетчика текущей строки 5 применяется при работе в режиме «Счет фотонов 2». Счетчик 8 фиксирует номер строки начала вспышки и совместно с дополнительным разрядом 7 вычисляет центр вспышки на сигнальной полосе выборки, а счетчик фоновой полосы выборки 11 выполняет совместно с дополнительным разрядом 12 те же функции для фоновой полосы выборки. Индексные регистры 9, 10 необходимы для хранения

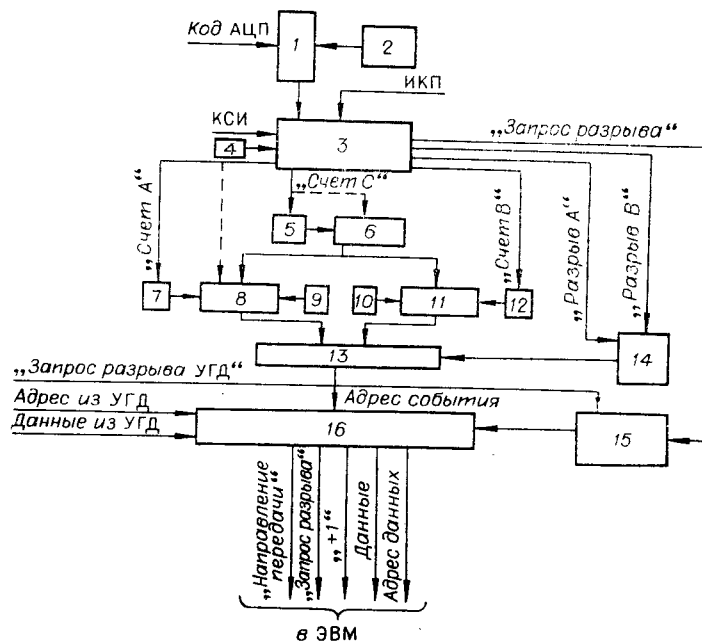


Рис. 2. Структурная схема сигнального процессора.

старших трех разрядов базового адреса для ввода данных в ЭВМ. Регистры 2, 4 — стандартные регистры добавляемого арифметического блока «Э-100И»: 2 — это регистр множителя частного (РМЧ), где хранится задаваемый экспериментатором уровень дискриминирования шумов, а счетчик тактов 4 определяет режим работы системы. Устройство 1 осуществляет сравнение кода АЦП с кодом РМЧ. Мультиплексор 16 необходим для подключения к входным шинам прямого доступа ЭВМ либо СП, либо дисплея УГД 43-1; управление мультиплексором осуществляет схема управления 15. Другой мультиплексор (13) по сигналам разрешения схемы управления 14 пропускает на вход мультиплексора 16 код регистра 8 или 11 в зависимости от сигнала разрешения. Сигнальный процессор предназначен для индивидуальной электронной обработки фотоэлектронных событий, в результате которой регистрируются с равным весом (независимо от амплитуды) фотоэлектронные вспышки, определяются центры событий и дискриминируется шум усилителей.

Для управления работой системы и обслуживания дисплея в память ЭВМ вводится программа-диспетчер, которая позволяет экспериментатору управлять процессом накопления информации и контролировать этот процесс. С пульта дисплея задаются режим работы, время накопления, осуществляется запуск программы, задержка и т. д. Накапливаемая информация в реальном времени визуализируется на экране дисплея, что обеспечивает удобство работы и определяет одно из преимуществ этого способа над фотографическим, где результат виден только после проявления фотопластинки.

Рассмотрим работу системы в различных режимах.

*Аналоговый режим.* В этом режиме измерения ведутся в одной полосе выборки по 500 каналам. Запуск АЦП происходит в месте выборки на каждой строке. Импульсы конца преобразования (ИКП) и код АЦП подаются в блок управления 3, на выходе которого формируются импульсы «Счет А», которые считаются счетчиком 8 (штриховая линия на рис. 2). Код из счетчика 8, сложенный с базовым адресом 9, через мультиплексор 13 проходит в регистр адреса мультиплек-

сора 16. Таким образом, адрес памяти формируется путем суммирования номера строки и базового адреса регистрируемого спектра. Блок управления 6 вырабатывает сигнал «Запрос разрыва», который при свободном канале прямого доступа позволяет записать информацию в ЭВМ. Измерения по всем строкам раstra в совокупности составляют распределение интенсивности вдоль спектра. Накопление информации программно осуществляется в ЭВМ и контролируется на экране УГД 43-1.

*Режим «Счет фотонов 1».* Регистрация информации идет также по 500 каналам. Прежде чем запустить систему в режиме «Счет фотонов», необходимо в регистре 2 установить код уровня дискриминирования. Из кадровых синхроимпульсов (КСИ) в блоке управления 3 формируются управляющие импульсы, которые устанавливаются в начальное состояние все счетчики. По каждому импульсу конца преобразования, пришедшему с АЦП, генерируется импульс «Счет С», который считается счетчиком 6. В результате в счетчике 6 формируется код номера текущей строки. Если код АЦП оказался меньше кода РМЧ, то в память ЭВМ запись не производится. Как только код с АЦП будет больше значения РМЧ, то код из счетчика 6 передается в 8, фиксируя тем самым момент начала вспышки. Если при последующих измерениях код АЦП по-прежнему выше уровня дискриминирования, то в счетчик 8 через дополнительный разряд 7 поступают импульсы «Счет А». Таким образом, в счетчик 8 дополнительно поступают импульсы, число которых равно половине числа строк, занимаемых вспышкой. Как только код АЦП становится меньше кода 5, адрес центра вспышки, находящийся в счетчике 8, сложенный с базовым адресом 9, подается через мультиплексоры 13 и 16 в ЭВМ. По адресу, соответствующему центру вспышки, в память ЭВМ добавляется единица. Накопление информации осуществляется в ЭВМ и контролируется в реальном времени на дисплее.

*Режим «Счет фотонов 2».* При регистрации слабых астрономических объектов появляется необходимость тщательного учета фона неба. Это условие потребовало организации счета фотонов по двум полосам выборки, т. е. по 1000 каналам. В этом режиме на строке происходят два запуска АЦП (на спектре и на фоне). Центры вспышек определяются аналогично режиму «Счет фотонов 1», но так как события могут появляться на обеих полосах выборки одновременно, то для первой полосы центры вспышек находятся с помощью счетчиков 7 и 8, а для второй полосы выборки — с помощью счетчиков 11 и 12. Определенные адреса центров событий через мультиплексоры 13 и 16 подаются в ЭВМ, где по этим адресам прибавляются единицы. Накапливаемые спектры в реальном времени визуализируются на экране дисплея.

На рис. 3 приведен фотоснимок с экрана видеоконтрольного устройства (ВК-12) фотоэлектронных скинтилляций ЭОП, а рис. 4 иллю-

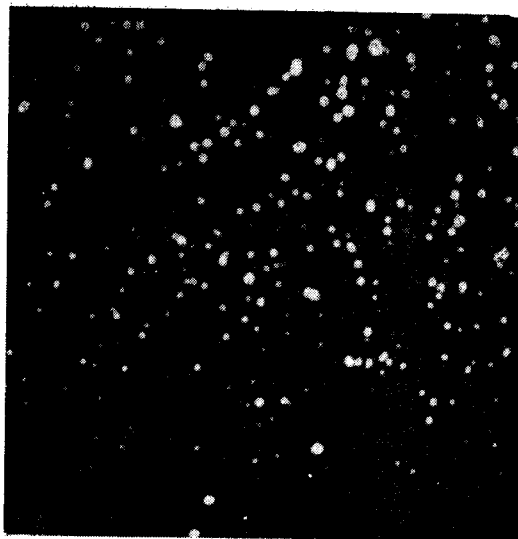


Рис. 3. Фотография с экрана ВК-12 фотоэлектронных событий ЭОП (экспозиция 1' с).

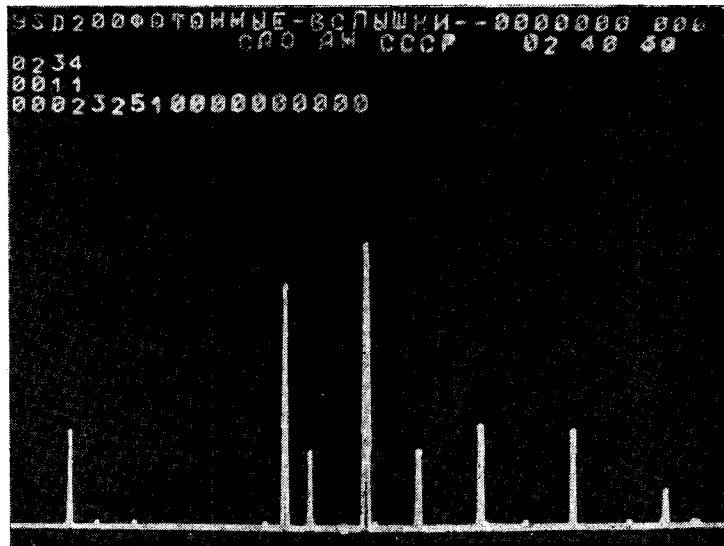


Рис. 4. Фотография фотоэлектронных вспышек с экрана дисплея. По горизонтальной оси — номер канала от 0 до 499, по вертикальной — амплитуда фотоэлектронных вспышек.

стрирует фотоэлектронные вспышки, зарегистрированные в полосе выборки при считывании одного кадра в аналоговом режиме.

Описанная установка прошла лабораторные испытания, где исследовались ее основные характеристики. Приведем некоторые из них. Так, на рис. 5 представлена зависимость скорости счета системы от уровня дискриминирования. По оси абсцисс отложен уровень дискриминирования, по оси ординат — количество отсчетов за кадр, т. е. сумма отсчетов по 500 каналам. Из рисунка видно, что имеется плато в интегральном распределении и провал в дифференциальном распределении. Из этого следует, что все фотоэлектронные события могут быть удовлетворительно детектированы, а шум можно устранить соответствующей установкой нижнего уровня дискриминации. Дискриминирование ярких сцинтилляций ионных событий в системе не производилось из-за небольшого их числа при рабочих напряжениях применяемого ЭОП.

На рис. 6 приведена частотно-контрастная характеристика телевизионного спектрофотометра, измеренная методом функции рассеяния [11] (ширина линии спектра сравнения на половине интенсивности составляет  $\sim 1,6$  канала, или  $\sim 37$  мкм). Для сравнения на рис. 6 приведены эти же характеристики для системы счета фотонов Боксенберга [5]. Из этих данных следует, что разрешение в аналоговом режиме гораздо ниже, чем в режиме «Счет фотонов». Лучшее разрешение в режиме «Счет фотонов» достигается за счет определения координат центров фотоэлектронных событий цифровым способом. Лучшее разрешение — это еще одно преимущество систем счета фотонов над традиционной регистрацией спектров с помощью ЭОП на фотопластинке.

Динамический диапазон описанной системы был определен изменением величины светового потока на входном фотокатоде ЭОП. Регистрирующий тракт сохраняет линейность в диапазоне от  $0,2 \cdot 10^4$  до  $80 \cdot 10^4$  квантов/см<sup>2</sup>·с. Это свидетельствует о том, что динамический диапазон нашей системы ниже, чем описанных в [4, 5]. Имеется несколько способов расширения динамического диапазона системы. Нижняя граница может быть уменьшена более чем на порядок подбором маломушьящего ЭОП или его охлаждением. Верхняя граница может

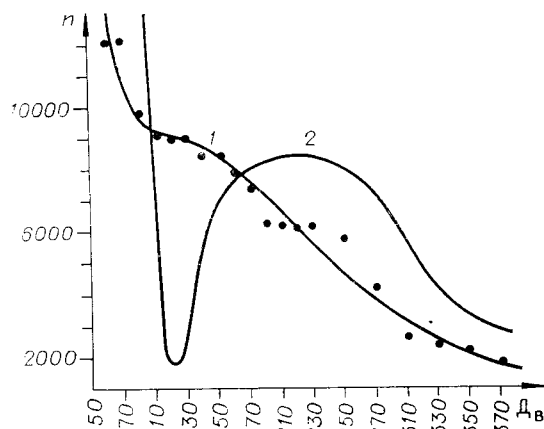


Рис. 5. Интегральное 1 и дифференциальное 2 распределения амплитуд фотоэлектронных событий.  
Напряжение на ЭОП 33 кв.

быть поднята в 2—3 раза увеличением частоты кадровой развертки телевизионного канала. Опыт работы с телевизионным счетчиком фотонов показал, что большое внимание при создании подобных систем необходимо уделять стабильности системы (стабильности источников питания, размера и положения развертки телевизионной трубки, устранения влияния внешних магнитных и электрических полей и т. д.), так как позиционная нестабильность при достаточно больших временах накопления снижает спектральное разрешение, затрудняет учет пространственных неоднородностей фотокатода и непосредственно сказывается на измерениях лучевых скоростей в спектрах исследуемых объектов.

Созданный телевизионный 1000-канальный счетчик фотонов был применен для исследований спектров внегалактических объектов на 6-метровом телескопе АН СССР. Изображения звезд на входной щели спектрографа являются точечными и имеют средний диаметр 0,2—0,3 мм. По этой причине на фотокатоде ЭОП звездный спектр выглядел в виде узкой полоски высотой 0,1—0,15 мм, на которую наводился измерительный строб сигнальной полосы выборки. Фоновый строб располагался на расстоянии 0,5—1 мм от рабочей площадки и регистрировал фон неба или спектр опорной лампы сравнения. На рис. 7 представлена фотография с экрана дисплея, показывающая результат накопления спектра галактики NGC3516 и спектра сравнения в сигнальной и фоновой полосе выборки соответственно. Эти спектры получены в режиме «Счет фотонов» при следующих условиях: дисперсия — 10 нм/мм, ширина входной щели спектрографа — 0,08 мм, время накопления — 3 мин. Из рисунка видно, что в 302-м канале за 3 мин накоплено 336 фотоэлектронных событий, т. е. средняя скорость счета в этом канале  $\sim 1,9$  фотоэлектронов/с·канал. Накопленный за это время шум (от фона неба и от темнового тока ЭОП) составил  $\sim 12$  фотоэлектронов/канал. Таким образом, результирующая точность измерения спектрального прибора в отдельном канале определяется фотонной статистикой. Кроме неопределенности, вызванной фотонной статистикой, в спектре содержится еще шум, обусловленный неодинаковой чувствительностью в каналах. Измерения, выполненные с непрерывным спектром лампы накаливания, показали, что частотный спектр этого

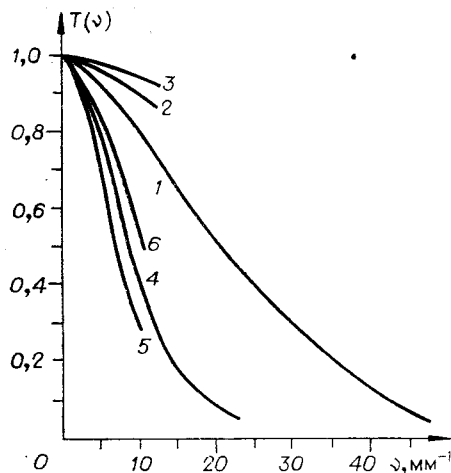


Рис. 6. Частотно-контрастные характеристики:

1 — ЧКХ системы в режиме счета фотонов;  
2, 3 — ЧКХ системы Боксенберга, работающей в режиме счета фотонов (увеличение 0,59 и 1,7);  
4 — ЧКХ системы в аналоговом режиме;  
5, 6 — ЧКХ системы Боксенберга в аналоговом режиме (увеличение 0,59 и 1,7).

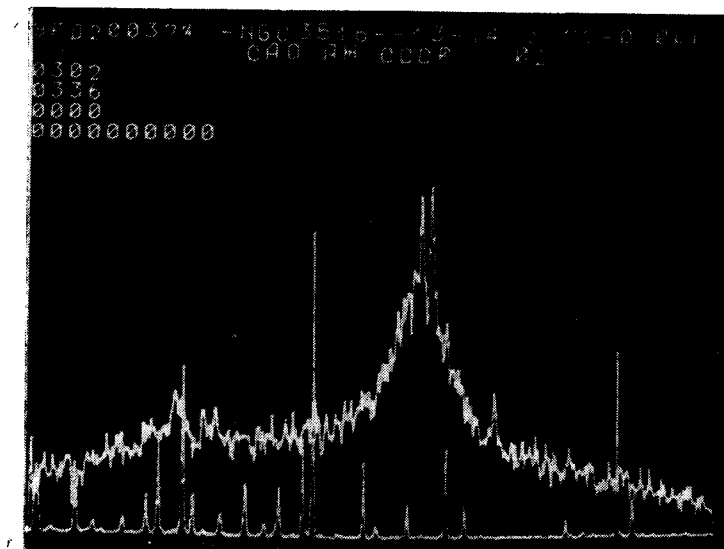


Рис. 7. Фотография с экрана дисплея.  
Верхняя кривая — спектр галактики NGC3516, нижняя — спектр сравнения  
(Ar, He, Ne).

шума мало изменяется от опыта к опыту. При необходимости проведения точных спектрофотометрических измерений слабых потоков это позволяет учесть и исключить указанную составляющую шума, накопив предварительно с хорошей статистической точностью непрерывный спектр лампы накаливания.

В заключение отметим, что, хотя описанный в данной работе телевизионный 1000-канальный счетчик фотонов разработан для регистрации спектров слабых астрономических объектов, системы подобного рода с успехом могут быть также применены и для решения других задач спектрофотометрии, где требуется регистрировать предельно слабые световые потоки на уровне единичных квантов света.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баглай Р. Д., Искольдский А. М., Кудрявцев М. И., Нестерихин Ю. Е. Электронно-оптический регистратор «спектр» как элемент системы автоматизации спектральных исследований.— «Автометрия», 1971, № 6.
2. Кондратьев А. Г., Лукин М. И. Техника промышленного телевидения. Л., Лениздат, 1970.
3. Boksenberg A.— In: Proc. Symp. "Astronomical use of television-type image sensors". Washington, Princeton University, 1971.
4. Robinson L. B., Wampler E. J.— In: Proc. Symp. "Astronomical observations with television-type sensors". J. W. Glaspey, G. A. H. Walker, eds. Vancouver, UBC, 1973.
5. Boksenberg A., Burgess D. E.— In: Proc. Symp. "Astronomical observations with television-type sensors". Vancouver, UBC, 1973.
6. McNall J. F. Note on the calculation of photon mass in an image tube scanner.— PASP, 1972, vol. 84, N 497.
7. Fort B., Boksenberg A., Coleman C. The effect of spatial and temporal sampling on the DQE (detective quantum efficiency) of an image photon counting system.— "IAU Colloquium", 1977, N 40.

8. **Токарев А. С., Котов В. Н.** Экранный пульт дисплея «Дельта».— В кн.: Средства ввода в ЭВМ и отображения графической информации. Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1974.
9. **Ковалев А. М., Токарев А. С.** Дисплей «Дельта» — новый универсальный графический терминал на базе мини-ЭВМ.— В кн.: Средства ввода в ЭВМ и отображения графической информации. Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1974.
10. **Алексеев В. А., Беломестных В. Н., Вьюхин В. Н., Прокопенко В. И., Касперович А. Н., Литвинов Н. В., Солоненко В. И., Шалагинов Ю. В., Юношев В. П.** Быстродействующая система ввода в ЭВМ одномерных оптических изображений.— «Автометрия», 1974, № 3.
11. **Lorre J. J.** Enhancement of spectra by digital convolution.— "Astron. J.", 1973, vol. 78, N 1.

*Поступила в редакцию 24 июля 1978 г.:  
окончательный вариант — 4 декабря 1978 г.*

---