

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

522.617:621f.382+.383.8 + .385.832.51

**ИССЛЕДОВАНИЯ СЛАБЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
МЕТОДАМИ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ*****В. В. Прокофьева***

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	501
1. Использование передающих телевизионных трубок суперорбитон и изокон для получения прямых снимков астрономических объектов и спектров звезд	502
2. Использование диджикона, кремникона и суперкремникона для точной фотометрии и спектральных исследований	508
3. Внеатмосферные и наземные исследования с помощью секона	512
4. Применение метода счета фотонов с помощью каскадного ЭОП в сочетании с телевизионными системами и ЭВМ для исследования спектров слабых галактик и квазаров	514
5. Использование телевизионных систем с твердотельными датчиками видеосигнала и ЭВМ для астрофизических исследований Солнца и звезд	516
Заключение	519
Цитированная литература	520

ВВЕДЕНИЕ

Телевизионные системы, об использовании которых пойдет речь в настоящем обзоре, относятся к широкому классу фотоэлектронных приборов¹. Приемником излучения в них является передающий телевизионный прибор (ПТП), работающий на основе внешнего или внутреннего фотоэффекта². Телевизионные системы принимают и передают информацию об оптическом изображении, проектируемом на светочувствительную поверхность ПТП. Поэтому они относятся также к классу систем воспроизведения изображения³, характерной особенностью которых является преобразование, воспроизведение и регистрация данных об оптическом изображении. К системам воспроизведения изображения относятся человеческий глаз, фотографические эмульсии, а также различные типы фотоэлектронных приборов, преобразующих оптическое изображение в электронное. По аналогии с фотоэлектрическими приемниками излучения последние можно, по-видимому, именовать фотоэлектрическими приемниками изображения. Кроме телевизионных систем, к ним относятся электронно-оптические преобразователи (ЭОП) и электронно-графические камеры. Различные типы ЭОП и электронных камер уже в течение двух десятилетий используются для астрономических наблюдений⁴⁻¹¹. Описание принципов их работы и устройства вошло в ряд учебников и учебных пособий^{12, 13}.

Отличительной особенностью телевизионной системы является преобразование пространственно-распределенной световой энергии (оптическое изображение) во временную последовательность электрических импульсов (видеосигнал). Этап преобразования видеосигнала в оптическое изображение, обязательный в вещательном телевидении, может отсутствовать в телевизионной аппаратуре, предназначенной для научных исследований. Согласно исторически сложившейся терминологии часть аппаратуры, преобразующая оптическое изображение в видеосигнал, называется передающей, а часть аппаратуры, где производится обработка видеосигнала и преобразование его в оптическое изображение, — приемной. Соответствующие фотоэлектрические и электронно-лучевые приборы также называются передающими и приемными. Каналом связи между этими двумя частями аппаратуры в наземных условиях астрономических наблюдений служит кабельная линия. В передающей части аппара-

туры производится поэлементное преобразование оптического изображения в электрический сигнал и его усиление. Порядок считывания (коммутации) элементов (развертка изображения) может быть любым, лишь бы он был одинаков в передающей и приемной частях аппаратуры. В приемной части аппаратуры производится усиление, обработка и регистрация видеосигнала, а также преобразование его в оптическое изображение. На выходе телевизионной системы информация может быть зарегистрирована как путем фотографирования оптического изображения с экрана видеоконтрольного устройства (ВКУ), так и в виде электрического сигнала. Преимуществом фотографического метода является его большая информационная емкость и удобство длительного хранения снимков. Последнее особенно важно в астрономии, где каждое наблюдение уникально. Преимуществом регистрации электрического сигнала является возможность оперативной обработки результатов наблюдений в ЭВМ.

Телевизионные системы для астрономических исследований начали использоваться сравнительно недавно. Первые телевизионные изображения слабых звезд были получены в начале 60-х годов¹⁴⁻¹⁹, а систематические фотометрические исследования звезд и планет начаты около 10 лет назад²⁰⁻²⁴. Пионерские работы в этой области были проведены в СССР. В 1974 г. вышла первая книга, описывающая опыт использования телевизионных систем для астрономических наземных наблюдений²⁵. В начале 70-х годов началось бурное развитие телевизионного метода наблюдений. Преимущества и недостатки этого метода подробно рассмотрены в обзорах²⁶⁻²⁹ и монографии²⁵. В последние годы выполнено большое количество астрономических исследований с помощью новых передающих приборов. Накопленный опыт позволяет нам сделать попытку классифицировать имеющееся изобилие различных астрономических телевизионных систем по типам передающих приборов и астрономическим задачам, решаемым с их помощью.

1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕДАЮЩИХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ТРУБОК СУПЕРОРТИКОН И ИЗОКОН ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРЯМЫХ СНИМКОВ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И СПЕКТРОВ ЗВЕЗД

Телевизионные трубки суперортикон и изокон имеют полупрозрачный входной фотокатод, и квантовая эффективность их не может превосходить квантовый выход внешнего фотоэффекта (10—20%). Использование предварительного усиления изображения в каскаде ЭОП позволяет довести чувствительность этих трубок до $5 \cdot 10^{-6}$ лк, что соответствует квантовому потоку 200 кв/сек на элемент разрешения $0,1 \times 0,1$ мм. Изокон, по сравнению с суперортикон, обладает лучшим отношением сигнал — шум, более высокой чувствительностью и большим динамическим диапазоном. Для астрономических наблюдений в СССР используются передающие трубки, разработанные под руководством Н. Д. Галинского (см.²⁵). Исследования, проведенные в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР, показали, что снижение рабочей температуры трубок с $+40^\circ\text{C}$ до 0°C повышает их пороговую чувствительность при регистрации точечных объектов в 6—10 раз^{25, 30, 31}. Одновременно появляется возможность накопления потенциального рельефа на мишени в течение десятков секунд при сохранении закона взаимозаместимости. В практике астрономических наблюдений часто применяется воздушная система охлаждения^{32, 33}.

Типичная блок-схема телевизионной аппаратуры, устанавливаемой на телескопе с целью получения прямых снимков астрономических объектов, приведена на рис. 1.

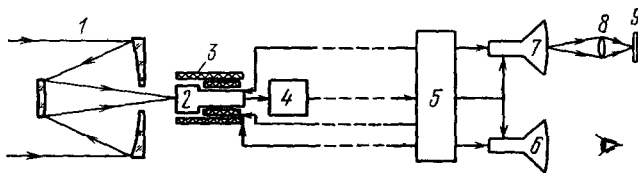


Рис. 1. Блок-схема астрономической телевизионной установки для получения прямых снимков.

1 — телескоп, 2 — передающая телевизионная трубка, 3 — фокусирующая и отклоняющая система (ФОС), 4 — предварительный усилитель, 5 — стойка и пульт управления, 6 — видеоконтрольное устройство (ВКУ) для визуальных наблюдений, 7 — ВКУ для фоторегистрации, 8 — объектив, 9 — кино- или фотокамера.

Регистрация телевизионного изображения производится обычно на мелкозернистую малочувствительную фотоэмульсию, позволяющую измерять почернение с высокой точностью. При наблюдениях слабых объектов в таких системах используется двух-

ступенчатое накопление информации: на мишени передающей трубки и на фотопленке. Последнее позволяет достаточно хорошо усреднить шумы считывающего лучка. Возможно использование и накопительной телевизионной трубки³⁴. Наивысшая проникающая способность была достигнута в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР при использовании суперортикона и каскадного электронно-оптического преобразователя^{17, 18}. На полуметровом телескопе за время экспозиции 4 сек были получены снимки звезд 20^m при отношении сигнал — шум около единицы. Световой поток от них за время экспозиции равнялся примерно 100 квантам. Чувствительность телевизионной системы оказалась близкой к чувствительности квазиидеального приемника света, имеющего квантовый выход, равный квантовому выходу фотокатода.

Для измерения блеска слабых звезд в 1962 г. в СССР был применен метод, аналогичный методу измерения блеска звезд по фокальным фотографическим снимкам^{16, 25, 35}. Полученная вначале точность измерения блеска звезд по одному снимку

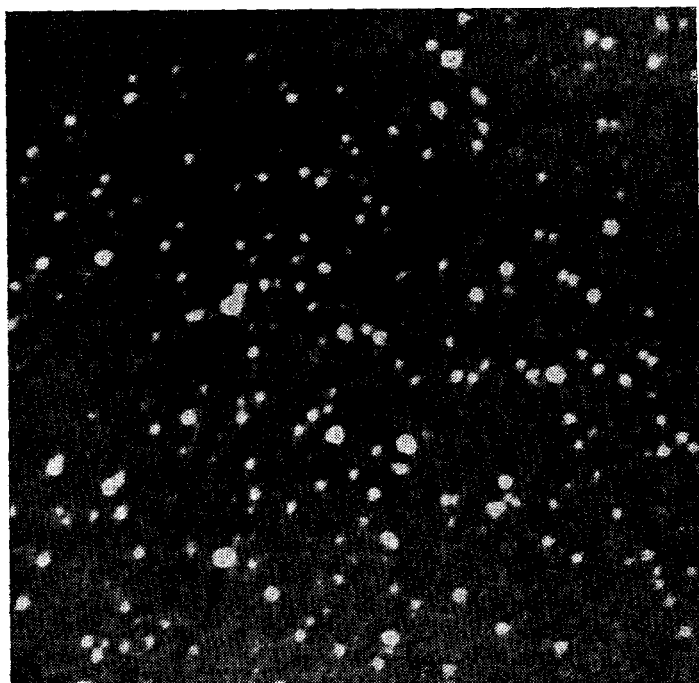


Рис. 2. Снимок центра звездного скопления NGC 188, полученный с помощью изокона с каскадом ЭОП.

$\pm 0^m,10$ была впоследствии улучшена до $\pm 0^m,05$ ($\pm 5\%$). Диапазон звездных величин, в котором калибровочные кривые линейны, составляет 2^m—3^m, а при использовании метода спрямления характеристических кривых^{36, 37} он достигает 4^m³⁸.

Изображения звезд, полученные с изоконом, на вид не отличаются от фотографических (рис. 2). Калибровочный график (рис. 3) линейен в диапазоне до 6^m, а точность измерения блеска звезд примерно такая же, как при использовании суперортикона³⁹. Телевизионные снимки протяженных объектов калибруются по снимкам ступенчатого ослабителя, полученным в том же режиме работы аппаратуры⁴⁰. Калибровочные графики также линейны в случае использования метода спрямления характеристических кривых. Оценки квантовой эффективности телевизионных систем будем делать в единицах действующей квантовой эффективности (detective quantum efficiency — DQE^{41, 42}), которая эквивалентна обобщенному квантовому выходу^{43, 25}. Значение DQE не зависит от природы световой чувствительности приемников света и позволяет количественно сравнивать их эффективность в реальных условиях эксперимента. Согласно определению

$$DQE = (S/N)_{\text{вых}}^2 / (S/N)_{\text{вх}}^2,$$

где $(S/N)_{\text{вх}}$ и $(S/N)_{\text{вых}}$ — отношения сигнал — шум на входе и выходе приемника света. DQE реального приемника света численно равно коэффициенту пропускания

серого светофильтра, который надо установить перед идеальным приемником для получения того же результата. Отношение сигнал — шум на входе приемника света при получении прямых снимков звезд определяется по потоку квантов от звезды с известным блеском²⁵. Отношение сигнал — шум на выходе оценивается по найденной из

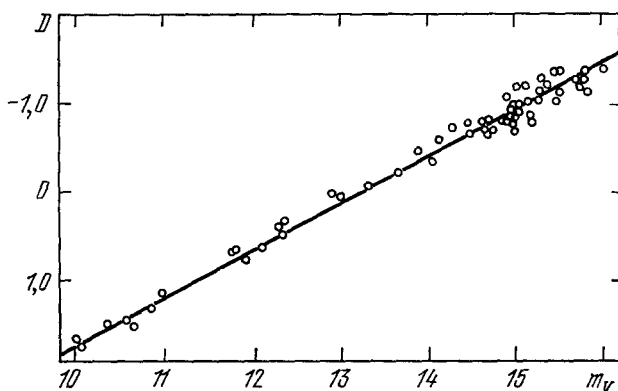


Рис. 3. Калибровочный график, построенный по данным фотометрии снимка скопления NGC 188, полученного с помощью изокона в цветовой системе «V» на полуметровом телескопе с экспозицией 2 сек.

По оси абсцисс отложены звездные величины m_V , по оси ординат — величина $D = \lg [(n_F/n_{ЗВ}) - 1]$, где $n_{ЗВ}$ и n_F — отсчеты микрофотометра при наведении постоянной по размерам диафрагмы на изображение звезды и на фон около него.

фотометрической обработки негативов средней квадратичной ошибке измерения блеска звезд, которая представляет собой относительную точность измерения светового потока³⁶. Результаты определения DQE телевизионной системы с разными передающими трубками в реальных условиях наблюдений слабых звезд 17^m — 19^m на полуметровом телескопе приведены в табл. 1. Там же в последней строчке приведены значения DQE для телевизионной установки Уокера и др. (см.⁴⁴).

Т а б л и ц а I
Действующая квантовая эффективность DQE телевизионной системы с суперорбитиком и изокон

Передающая камера	DQE, %	Время экспозиции
ЭОП + ЛИ-214	2,0	1 мин
ЛИ-217	2,0	16 сек
ЛИ-217	1,0	9 мин
ЭОП + изокон (СССР)	4,0	32 сек
ЭОП + изокон (Канада)	4,0	—

Высокая квантовая эффективность телевизионного метода позволяет проводить наблюдения слабых звезд на небольших по размеру телескопах и получать при этом снимки с высоким временным разрешением. Для примера на рис. 4 приведены результаты наблюдений одной и той же переменной звезды ES Ser, полученные на телескопах одинакового размера ($D = 50$ см) с помощью фотографического и телевизионного методов⁴⁵: 66 фотографических снимков были получены за 40 часов наблюдений, 400 телевизионных — за 5,5 часов. Время экспозиции различалось в 40 раз. Большое количество телевизионных снимков позволило обнаружить различие кривых блеска переменной звезды от цикла к циклу (см. разные значки на верхней кривой). На рис. 5 приведена кривая блеска двойной переменной звезды 442 Cas во время затмения одного из ее компонентов, полученная с помощью телевизионной аппаратуры в Крымской астрофизической обсерватории⁴⁶. Значительное по величине изменение яркости звезды (в 10 раз за час) затрудняло изучение кривой блеска фотографическим методом.

На этой же телевизионной установке впоследствии были получены кривые блеска ряда слабых переменных ⁴⁷⁻⁵⁰. Примером изучения переменных звезд с неправильными изменениями блеска являются исследования характера переменности оптического излучения рентгеновского источника Лебедь X-2 ⁵¹, кривые блеска Сверхновых звезд ⁵², а также измерения блеска объектов типа BL Lac ^{53, 54}. Ряды наблюдений нестационарных звезд типа Т Тельца в узких спектральных областях позволили сделать новые интересные выводы об их физической природе ⁵⁵. Было обнаружено, что

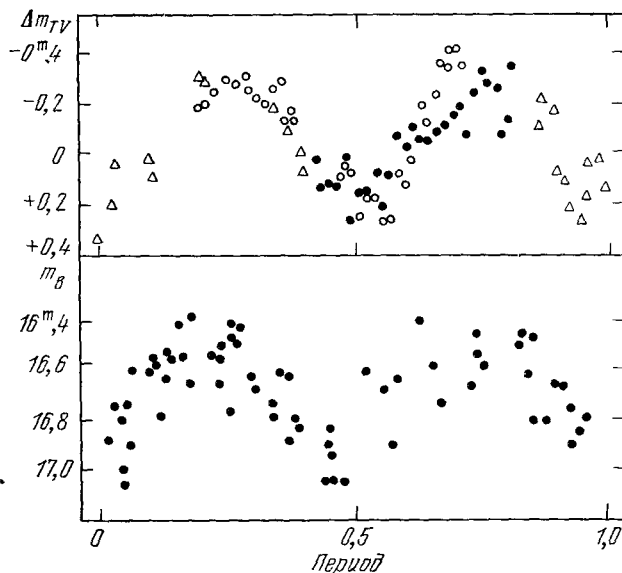


Рис. 4. Данные о блеске затменной переменной звезды ES Сер, полученные по телевизионным (вверху) и фотографическим (внизу) наблюдениям.

Каждый значок в верхней части представляет средний блеск звезды, определенный по пяти телевизионным снимкам.

у звезд высокой светимости преобладают радиативные процессы в газовой-пылевой оболочках, в то время как у звезд низкой светимости доминируют процессы типа хромосферной активности. Разработан и используется для наблюдений телевизионный метод поиска сверхновых звезд в галактиках ⁵⁶⁻⁵⁹.

Возможность управления электронным изображением в передающей телевизионной трубке позволила разработать оригинальную аппаратуру для поиска пульсаров ^{25, 60-62}. Принцип ее работы заключается в следующем. Изменение электромагнитного поля катушек, расположенных около входной камеры ЭОП передающей трубки, позволяет дискретно смещать изображение изучаемого объекта в рабочем поле телевизионной системы. Число смещений изображения соответствует числу фазовых интервалов, на которые разбивается период изменения блеска наблюдаемого объекта. Если частота смещений совпадает или кратна частоте изменения блеска пульсара, то на телевизионном экране изображение объекта будет видно одновременно в нескольких фазовых интервалах, представляющих его кривую блеска. В качестве примера на рис. 6 приведены фрагменты снимков пульсара NP 0532, расположенного в центре Крабовидной туманности. Снимки были получены в марте 1970 г. в Симеизе на 0,8-метровом телескопе Крымской астрофизической обсерватории. Временное разложение производилось на 16 интервалов, причем длительность каждого составляла около 2 мсек, а световая энергия накапливалась в течение одной минуты. На рис. 7 приведен снимок звезд с временным разложением их изображений на восемь фазовых интервалов. Преимуществом телевизионного метода поиска пульсаров является его высокая квантовая эффективность и возможность одновременного поиска в пределах некоторой площадки неба, определяемой размером входного фотокатода и фокусным расстоянием телескопа.

Телевизионная система с передающей трубкой ЛИ-217 ²⁵ с успехом используется для получения прямых снимков больших планет через узкие светофильтры. Высокая контрастная чувствительность аппаратуры и возможность оперативного выбора оптимального контраста и яркости изображения планеты на телевизионном экране позволили регистрировать малококонтрастные изображения деталей облачного покрова Венеры в ультрафиолетовой области спектра ⁶³. На рис. 8 приведены снимки Венеры

в ультрафиолетовой и синей областях спектра, полученные в ноябре 1975 г., когда на орбите около нее работали межпланетные автоматические станции «Венера-9» и «Венера-10». Темные пятна на диске планеты хорошо видны в ультрафиолетовой области спектра и едва заметны в синей. Точность определения отношения яркостей деталей диска по одному снимку составила $\pm 3\%$, а для каждой даты — $\pm 1\%$.

В течение четырех противостояний Марса в Крымской астрофизической обсерватории работал патруль облачных образований на Марсе^{64, 65}. Наблюдения Марса

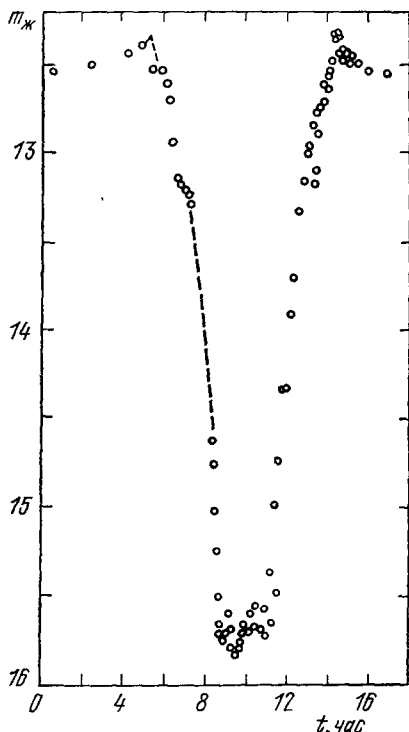


Рис. 5. Кривая блеска переменной 442 Cas, полученная во время затмения главного компонента.

солнечного спектра используются суперортиконы с высоким отношением сигнал — шум⁷⁴, а в 1974 г. испытывался спектрогелиограф-магнитограф с обработкой видеосигнала в ЭВМ в аналоговой форме⁷⁵. С его помощью найдены вариации магнитных полей на Солнце с периодом 270 сек⁷⁵.

Для спектральных исследований астрономических объектов изокон с ЭОП применяется в университете Британской Колумбии в Ванкувере^{44 77}. Спектр располагается вдоль кадровой развертки. Благодаря этому резко снижается скорость поступления информации и оказывается возможным использовать стандартную аппаратуру кодирования видеосигнала и вести обработку данных в ЭВМ. Для регистрации двух спектров используется память емкостью 1800 слов по 16 бит. Процесс наблюдений контролируется на дисплее. По желанию наблюдателя могут быть получены данные об интенсивности одного спектра, разность интенсивностей двух спектров и разность интенсивностей спектров, полученных при разных положениях поляроида при измерениях магнитных полей. Спектры переменной звезды с характерным временем в несколько минут. С высокой точностью получены профили зеленой линии дважды ионизованного кислорода в сейфертовских галактиках NGC 4151 и NGC 1068 и показано, что в каждой галактике имеется по четыре области излучения этой линии⁷⁸. Обнаружена переменность эмиссионных линий в спектре галактики NGC 1068 с характерным временем около месяца⁷⁹.

Суперортикон с успехом используется для определения положений искусственных космических объектов^{80–82}. Применение телевизионной системы позволило увеличить проникающую способность оптического метода наблюдений искусственных спутников Земли на 5^м по сравнению с использованием фотографии. Важной задачей

проводились в 10 спектральных участках от 377 до 760 нм. Сопоставление результатов телевизионного патруля с данными визуальных и фотографических наблюдений Марса показало, что по порогу регистрации малококонтрастных облачных образований телевизионный метод близок к визуальному и лучше фотографического. Так, например, начало глобальной пылевой бури 1971 г. на Марсе было зарегистрировано телевизионным методом раньше, чем фотографическим⁶⁶. Большое количество наблюдений в широком диапазоне спектра позволило получить спектрофотометрические данные об отражательной способности марсианских облаков различных типов⁶⁷. Было найдено также объяснение такого загадочного явления, как «синие прояснения» на Марсе, заключающееся в том, что видимость контуров марсианских «морей» в синей и ультрафиолетовой областях спектра появляется в тех случаях, когда из-за подъема пыли со светлых марсианских областей (материков) увеличивается контраст море — материк по всему спектру⁶⁸. Подробно был прослежен процесс развития и затухания глобальной пылевой бури в 1971–1972 гг.^{69–71}. На рис. 9 приведены снимки Марса во время пылевой бури и при чистой марсианской атмосфере, полученные в течение разных противостояний Марса. На всех снимках представлено изображение одной и той же стороны Марса.

Первые опыты применения суперортикона для спектральных исследований звезд были проведены в начале 60-х годов^{16, 72}. В Главной астрономической обсерватории в Пулкове недавно были получены регистрограммы лабораторных спектров с помощью суперортикона и изокон⁷³. Там же для регистрации

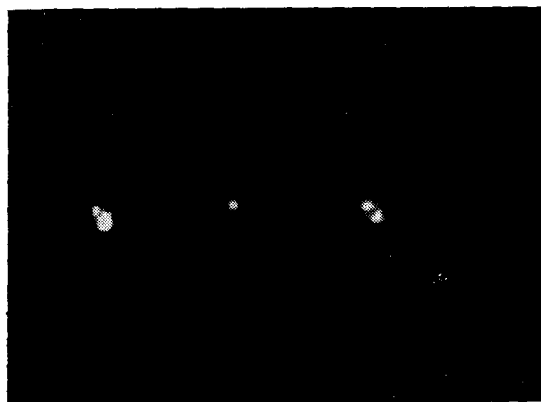


Рис. 6. Фрагменты снимка пульсара в Крабовидной туманности и звезды, расположенной на расстоянии около $4''$ от него.

Получены во время максимального блеска пульсара (слева), минимального (в центре) и вторичного небольшого максимума (справа). Длительность фазы на каждом снимке около 2 мсек. Снимки получены на 0,8-метровом телескопе с экспозицией 1 мин.

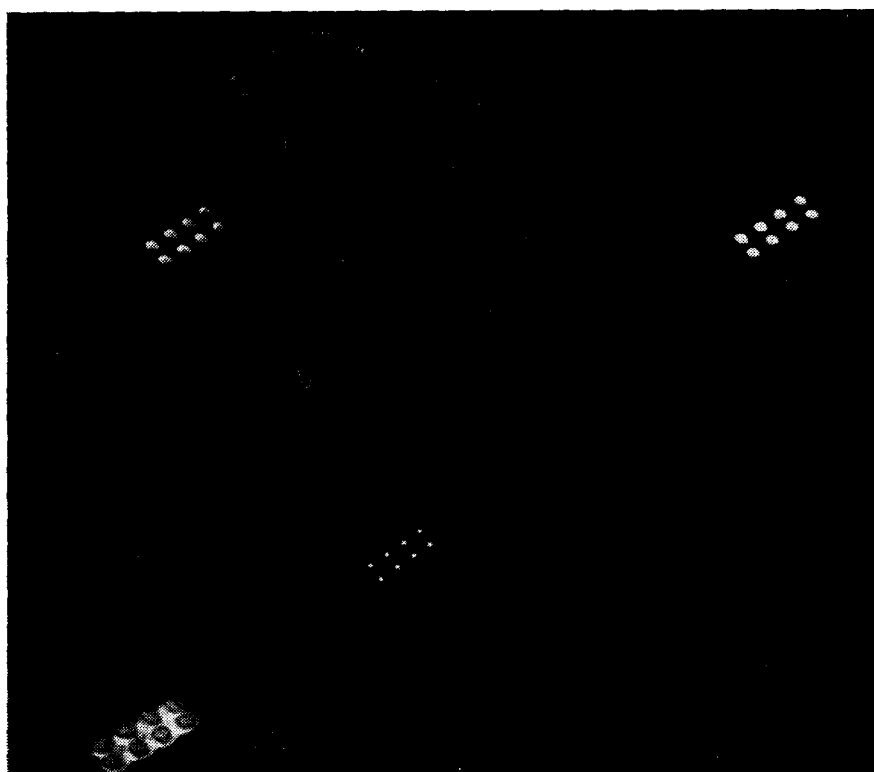


Рис. 7. Снимок звездного поля размером около 15 угл. мин. , иллюстрирующий метод поиска пульсирующего объекта. На снимке видны звезды до 16^m .

являются наблюдения и определения координат далеких космических объектов (ДКО), уходящих от Земли в межпланетное пространство для исследования Луны, Марса, Венеры и др. Два близких по времени получения снимка станции «Луна-7» и ее ракеты-носителя приведены на рис. 10⁸³. На снимках видно перемещение изображения ракеты-носителя (отмечено черточками) в поле зрения. Для определения координат космических объектов сейчас используются как телевизионные снимки⁸⁴, так и метод прямого отсчета разницы координат наблюдаемого объекта и звезд сравнения⁸⁵.

Телевизионный метод успешно применяется и для наблюдений малых планет и метеоров⁸⁶⁻⁸⁸. На 2,6-метровом телескопе Крымской астрофизической обсерватории были получены снимки астероида Икар. Из-за большой угловой скорости его перемещения вблизи Солнца фотографический метод нельзя было использовать⁸⁶. Успешные

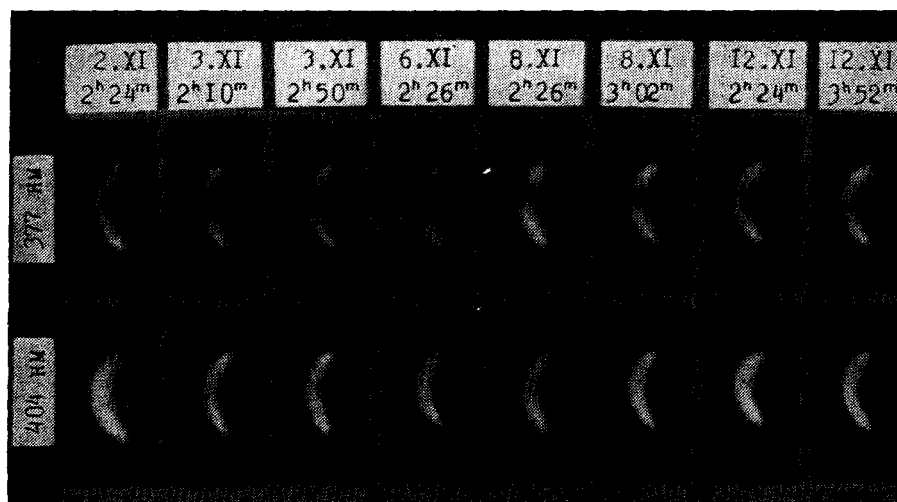


Рис. 8. Телевизионные снимки Венеры в двух областях спектра ($\lambda_{эфф} = 377$ нм — верхний ряд, $\lambda_{эфф} = 404$ нм — нижний ряд), полученные на полуметровом телескопе в Крымской астрофизической обсерватории в ноябре 1975 г.

Моменты наблюдений приведены в мировом времени.

телевизионные наблюдения Икара были проведены также и на полуметровом телескопе⁸⁷. С помощью телевизионного метода были изучены особенности свечения слабых метеоров в атмосфере Земли, проведен количественный анализ спектров, отмечены особенности излучения отдельных спектральных линий и полос вдоль пути метеоров⁸⁴⁻⁸⁸.

Телевизионная аппаратура с суперорбитиком использовалась для изучения неустойчивости изображений звезд, обусловленной турбулентностью земной атмосферы⁹⁹, а также для регистрации дрожаний и анализа четкости изображения Солнца¹⁰⁰. На основе телевизионной аппаратуры с каскадным ЭОП был сделан быстродействующий затвор, срабатывающий по команде от специального датчика моментов хороших изображений^{101, 102}. Применение его в реальных условиях наблюдений повысило вероятность получения снимков звезд хорошего качества¹⁰³.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИДЖИКОНА, КРЕМНИКОНА И СУПЕРКРЕМНИКОНА ДЛЯ ТОЧНОЙ ФОТОМЕТРИИ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Диджикон, кремникон и суперкремникон можно отнести к одному классу приборов, так как все они являются вакуумными датчиками электрического сигнала, несущего информацию об оптическом изображении, а в качестве основного элемента в них используются кремниевые диоды. Диджикон представляет собой камеру ЭОП, в которой электронное изображение проектируется на систему кремниевых диодов¹⁰⁴⁻¹⁰⁷. Растровое сканирование в нем достигается путем использования квадрупольного поля отклоняющих катушек, расположенных около ЭОП. Действующая квантовая эффективность диджикона равна 4% в синей области спектра. Разработан и используется для астрономических наблюдений диджикон, имеющий около 200 диодов и соответственно столько же выводов. Каждый диод имеет размер 40×300 мкм. Для сокращения числа выводов в последнее время стали использовать самосканирующие диодные матрицы

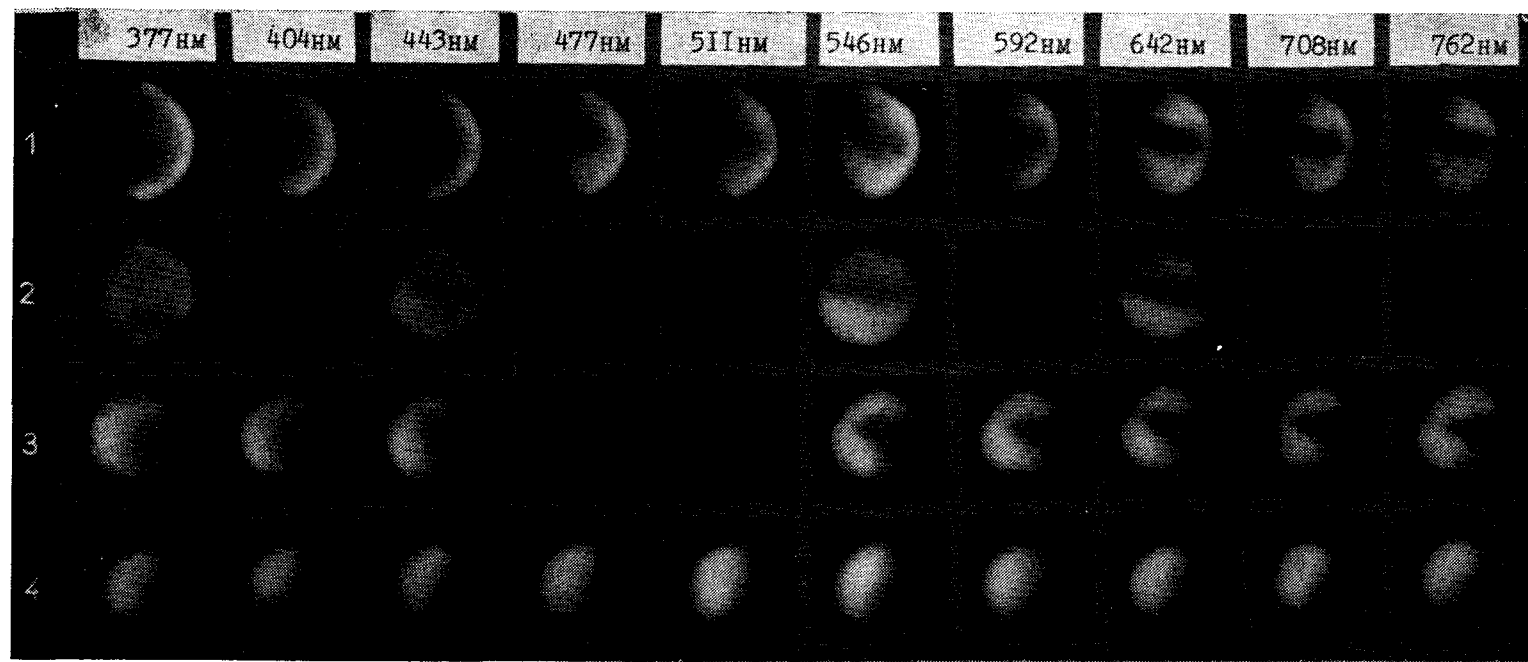


Рис. 9. Телевизионные снимки Марса в разных областях спектра (надписи сверху).

1—11 сентября 1973 г. (легкая синяя дымка на лимбе), 2—22 августа 1971 г. (чистая атмосфера Марса), 3—27 сентября 1971 г. (начало развития пылевой бури), 4—7 ноября 1971 г. (глобальная пылевая буря).

¹⁰⁸⁻¹¹⁰ (см. ниже). Трубка, имеющая 2048 элементов разрешения, работала на 2,7-метровом телескопе обсерватории Мак-Дональд с 1974 по 1976 г., и ряд астрофизических исследований был выполнен с ее помощью ^{111, 112}.

Нашедший широкое применение в астрономии кремникон относится к классу видиконов, отличительной особенностью которых является использование внутреннего фотоэффекта. Квантовая эффективность кремникона может достигать 80—100%, однако высокий уровень шумов не позволяет пока реализовать ее. Кремниконы работают при минимальной освещенности на фотокатоде около 10^{-2} лк. Область их спектральной чувствительности простирается от 300 до 1200 нм. Кремникон имеет широкий динамический диапазон (10^3 — 10^5), внутри которого сигнал является линейной функцией светового потока. Это существенно упрощает фотометрическую калибровку и позволяет регистрировать весьма малые контрасты. Чувствительность кремниевой мозаики стабильна во времени, и неравномерности чувствительности трубки по полю могут

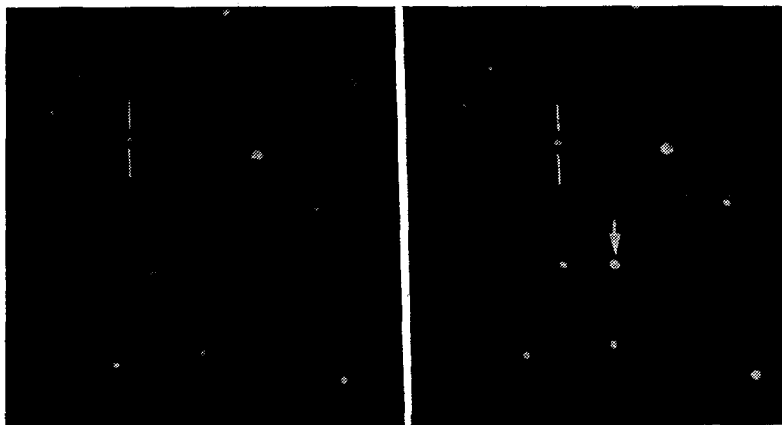


Рис. 10. Снимки космической станции «Луна-7» и ее ракеты-носителя в одном и том же поле звезд, полученные на полуметровом телескопе.

Из-за сильного изменения яркости станции видно лишь на одном снимке (отмечено стрелкой).

быть легко учтены при обработке наблюдений. Возможность медленного считывания информации с мишени позволяет использовать недорогую вычислительную технику. К недостаткам кремникона относится необходимость его глубокого охлаждения с целью снижения шумов и увеличения времени накопления информации на его мишени. Накопление в течение часа возможно лишь при температуре сухого льда (-78°C). Большие неудобства при работе создает также наличие интерференционной картины, образующейся между структурой сетки поля и дискретной структурой мишени в тонком слое окиси кремния ^{114, 115}.

Первые астрономические наблюдения с помощью кремникона были выполнены Мак-Кордом и Вестфалем ^{116, 117}. На базе кремникона ими был создан двумерный фотометр с регистрацией видеосигнала в цифровом виде на магнитной ленте. Изображение имело 256×256 элементов. Авторами были получены опытные снимки Марса в 20 спектральных участках. Точность фотометрирования достигла 1%. Проницающая способность, полученная с кремниконом при наблюдениях звезд, оказалась невысокой: за время накопления 100 сек на 1,5-метровом телескопе были получены изображения звезд 18^m в условиях охлаждения кремникона до -65°C . В Массачусетском технологическом институте в США разработана методика фотометрических измерений на кремниконе ¹¹⁸⁻¹²⁰. Сравнение измерений, сделанных на телескопе с кремниконом и с помощью электрофотометра, показало, что они согласуются между собой с точностью не хуже 1%.

Телевизионные системы на базе кремникона начинают использоваться для астрономических наблюдений ¹²¹⁻¹²⁵. Работы, проведенные в университете Британской Колумбии (Канада) показали, что кремникон выгодно использовать в красной области спектра ($\lambda \geq 650$ нм), где он по чувствительности лишь незначительно уступает изокону ⁴⁴.

Итак, кремникон используется для регистрации малоконтрастных деталей протяженных объектов и точной фотометрии при достаточно больших световых потоках. Кроме этого, он может применяться для наблюдений в ближней инфракрасной области спектра, где чувствительность других приемников света низка.

Существенное повышение чувствительности было достигнуто в суперкремниконах^{126, 127}. Эти трубки имеют мультищелочной входной фотокатод и секцию переноса изображения. Электронное изображение проектируется на мишень из кремниевых диодов, причем каждый фотоэлектрон, обладающий энергией в несколько киловольт, образует в мишени множество носителей тока. Благодаря этому трубка имеет внутреннее усиление от нескольких сотен до 1500—2000 и чувствительность ее существенно превосходит чувствительность кремникона. Суперкремникон работает при освещенностях до 10^{-5} лк.

Первые испытания суперкремникона для астрономических наблюдений¹²⁸ прошли успешно, и впоследствии была разработана специальная аппаратура с цифровой регистрацией данных для наблюдений спектров предельно слабых объектов¹²⁹.

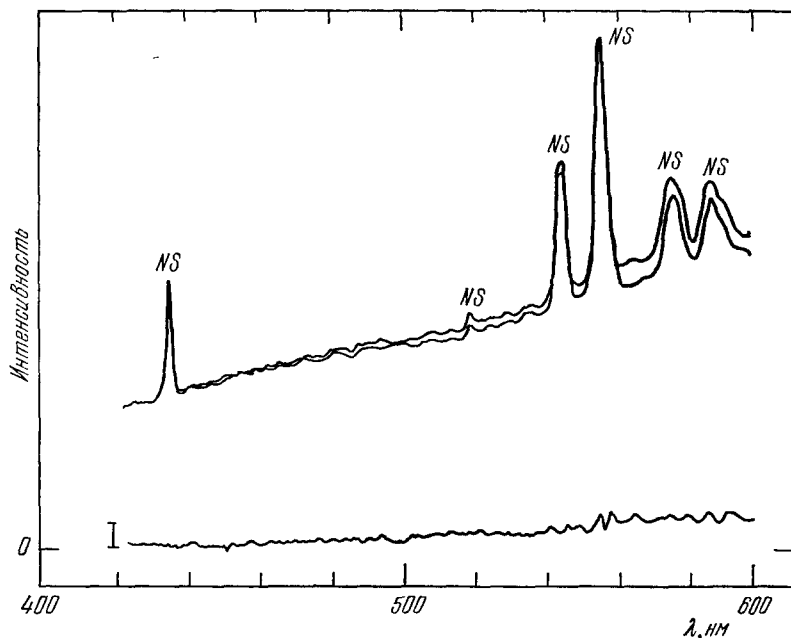


Рис. 11. Данные призмного спектрографа с суперкремниконом, полученные на 5-метровом телескопе при наблюдениях спектра галактики ($\sim 21^m$) в скоплении 0024-1654 с красным смещением $z = 0,39$.

Верхняя кривая соответствует наблюдаемой сумме интенсивностей спектра галактики и ночного неба, средняя — интенсивностям спектра ночного неба, нижняя представляет спектр галактики, полученный вычитанием интенсивностей двух первых спектров. Значками NS обозначены линии излучения ночного неба.

В ней используется призмный спектрограф и коммерческий суперкремникон с электростатической фокусировкой и волоконной планшайбой на входе. В конце 1974 г. аппаратура была установлена в кассегреновском фокусе 5-метрового телескопа. Скорость получения информации оказалась довольно высокой: спектры нормальных галактик с красным смещением $z = 0,2$ ($m \approx 20^m$) получались при экспозициях 30 мин, а спектры галактик с $z = 0,39$ — за 90 мин (рис. 11). На новом спектрографе поставлена задача продолжения диаграммы Хаббла в сторону слабых объектов. Были получены красные смещения для 37 галактик, из которых 25 имели красное смещение более 0,2¹³⁰.

В настоящее время на ряде обсерваторий планируется использовать суперкремникон для астрофизических исследований. На базе коммерческого суперкремникона с использованием перед ним камеры ЭОП с магнитной фокусировкой разрабатывается установка для автоматического поиска Сверхновых звезд¹³¹. Во Франции суперкремникон установлен на щеле спектрографа 1,5-метрового телескопа в Верхнем Провансе¹³². В Кембриджском университете в Англии заканчивается разработка системы с цифровой регистрацией спектра, управляемой ЭВМ¹³³. Такая же система разработана на обсерватории Китт-Пик в США¹³⁴. В Бельгии суперкремникон используется для регистрации изображений визуально двойных звезд с расстоянием между компонентами $1''$ — $5''$ ¹³⁵. Для интерферометрических наблюдений звезд во Франции используется система на счете фотонов, в которой перед суперкремниконом для дополнительного усиления света применяется микроканальная пластина¹³⁶. Для спектро-

скопии звезд суперкремний используется на 1,5-метровом телескопе обсерватории Серро-Тололо в Чили¹³⁷. При спектральном разрешении 1 нм на 1,5-метровом телескопе получены спектры звезд 18^m. Аппаратура для наблюдений в ближней инфракрасной области спектра разработана в научной лаборатории Лос-Аламос¹³⁸⁻¹⁴¹. Перед суперкремниевым установлена камера ЭОП с кислородно-цезиевым фотокатодом. На метровом телескопе во Флагстаффе (Аризона) получены инфракрасные снимки ряда площадок из обзора неба, сделанного в области двух микрон. Обнаружены две инфракрасные звезды и подтверждено отождествление семи объектов.

3. ВНЕАТМОСФЕРНЫЕ И НАЗЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СЕКОНА

Передающая телевизионная трубка секон была создана более 10 лет назад для нужд внеатмосферной астрономии¹⁴²⁻¹⁴⁷. В основу разработки трубки была положена только что открытая вторичная электронная проводимость тонких пористых слоев диэлектрика¹⁴⁶. По сокращенному английскому названию этого эффекта (*second electron conductivity* — SEC) трубки стали называться секонами. Их модификация, предназначенная для регистрации ультрафиолетового излучения, известна под названием увикон. Секон имеет секцию переноса изображения, электронное изображение проектируется на сек-мишень, расположенную на сигнальной пластине²⁵. Секоны работают при минимальных освещенностях около 10^{-2} лк. Преимуществом секона является возможность накапливать и хранить информацию на мишени в течение продолжительного времени.

Наряду с этими преимуществами секон обладает рядом недостатков: мишень секона разрушается при больших освещенностях, коэффициент усиления мишени сильно зависит от уровня освещенности фотокатода, причем эта зависимость разная в различных участках поля.

В декабре 1968 г. стартовала орбитальная астрономическая обсерватория ОАО-2, на которой находились четыре трубки «увикон», установленные на телескопах с диаметром зеркала 32 см и полем зрения $2^\circ \times 2^\circ$. Два увикона имели чувствительность в области 105—320 нм, а два — в области 105—200 нм. Растр имел 256×256 элементов, и каждый кадр имел информацию $5 \cdot 10^5$ бит, передаваемую на землю в цифровом виде по каналу телеметрии. Скорость считывания с мишени увикона была согласована со скоростью передачи информации на Землю. Ставилась задача получения данных о яркостях 100 000 звезд. Из-за выхода из строя одной из камер и падения чувствительности остальных, сопровождавшихся нарушением фотометрической калибровки, были определены яркости всего 5000 звезд¹⁴⁸. Обработка видеоданных проводилась в ЭВМ по специальной программе. По лабораторным измерениям чувствительности трубок в 25 участках поля при десяти различных температурах мишени и трех уровнях освещенности фотокатода ЭВМ производила интерполяцию чувствительности аппаратуры на промежуточные значения температуры, освещенности и положения объекта в поле зрения¹⁴⁹. Тщательная обработка данных позволила получить каталожные значения блеска звезд с погрешностью $\pm 0^m,1-0^m,2$. Первые применения секона для космических исследований, несмотря на ряд неудач, показали возможность и перспективность использования современных передающих трубок в космосе.

На международном спутнике для ультрафиолетовых исследований планируется использование телевизионной системы как для отождествления изучаемой области неба, так и для регистрации спектров звезд в области длин волн 105—320 нм. Камера отождествления предполагает вид работы, когда изображение области неба, находящееся в фокальной плоскости телескопа, передается на Землю, и оператор проводит отождествление и тонкую коррекцию положения изображения объекта на щели спектрографа. Регистрация спектров будет производиться с помощью нескольких идентичных телевизионных камер. Спектр, даваемый эшелле, расположится на всей светочувствительной поверхности, диаметр которой составляет 25 мм. Число элементов раstra будет 768×768 . Предполагается использование серийного электростатического секона с волоконной планшайбой на входе (рис. 12)^{150, 151}. Перед секоном устанавливается камера ЭОП с безлиновым переносом изображения, имеющая фотокатод, чувствительный к ультрафиолетовой области спектра. В Принстонском университете под руководством Лоуренса разработан секон с магнитной фокусировкой. Трубка обеспечивает большее рабочее поле и лучшее линейное разрешение, чем электростатический секон.

В Морской исследовательской обсерватории (США) ведутся работы по использованию секонов в камере Шмидта с электронно-оптическим усилением изображения¹⁵². Камера имеет ультрафиолетовый фотокатод на твердой подложке и люминесцентный экран на выходе (рис. 13). Секон с волоконной планшайбой на входе устанавливается вплотную к экрану. Преимуществами такого проекта являются использование непрозрачного фотокатода с высоким квантовым выходом и заменяемость секона без нарушения работы всего прибора. В камере имеется набор сменных кор-

ректирующих пластин, сделанных из разных материалов, что обеспечивает выделение нужного спектрального участка. Перед камерой устанавливается плоское зеркало, на обратной стороне которого находится плоская дифракционная решетка. Поворотом

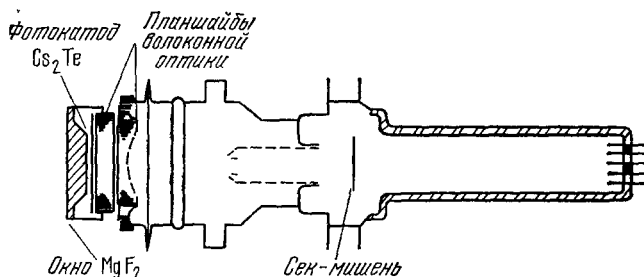


Рис. 12. Электростатический секон с установленным перед ним каскадом ЭОП без фокусировки.

Прибор используется в космосе для регистрации ультрафиолетового излучения звезд.

его осуществляется переход от наблюдения звездных полей к наблюдению спектров. Кроме снимков звезд в нескольких спектральных участках, камера позволяет получать также и спектры звезд с объективной решеткой.

На большом космическом телескопе предполагается установить только телевизионные приемники света. В спектрографах средней и малой дисперсии будут уста-

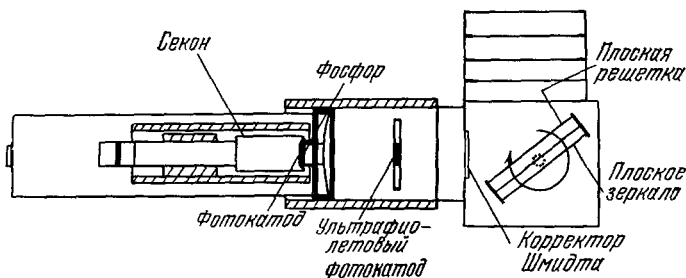


Рис. 13. Камера Шмидта с секоном для обзора неба в ультрафиолетовой области спектра

новлены камеры Шмидта с секонами с диаметром фотокаатода 25 мм. Для камер с большой дисперсией необходимы трубки с большими размерами фотокатодов. Возможно использование трубок, которые разработаны Лоуренсом.

В наземных условиях секоны в основном используются для таких вспомогательных задач, как отождествление слабых объектов, гидирование и фокусировка телескопов¹⁵³. За счет возможности накопления на мишени, пронизывающая способность гида на секоне оказалась на $2^{m,5}$ (в 10 раз) выше, чем при визуальных наблюдениях¹⁵⁴. На обсерваториях Хейла была разработана и регулярно используется на 5-метровом телескопе специальная телевизионная установка на секоне с предварительным усилением яркости при помощи однокамерного ЭОП¹⁵⁵. Телевидение позволило существенно сократить время на поиск нужного объекта и освободило наблюдателя от необходимости находиться около телескопа в процессе наблюдений. Телевизионный гид на секоне используется также в кассегреновском фокусе Ликского трехметрового телескопа¹⁵⁶.

В лаборатории Принстонского университета была создана телевизионная установка для наземных наблюдений спектров слабых объектов, в которой видеoinформация в цифровом коде поступала сразу на ЭВМ¹⁵⁷⁻¹⁶⁰. Установка предназначена для измерения лучевых скоростей и с 1970 г. эпизодически используется на 5-метровом телескопе для получения спектров квазаров и галактик. В октябре 1970 г. был получен спектр квазара PHL 957 ($m = 16^{m,5}$) с разрешением 0,07 нм в области длин волн 427—449 нм за время экспозиции 6 час¹⁶¹ (рис. 14). Дальнейшие наблюдения этого же квазара позволили получить для него значения лучевых скоростей с точностью до 0,02 нм. Позже были получены красные смещения для ряда других объектов¹⁶²⁻¹⁶⁴. Показано, что в некоторых случаях линии излучения квазаров образуются в несколь-

ких областях с разными лучевыми скоростями. Получены также спектры шести галактик с длинной щелью для изучения в них дисперсии скоростей¹⁶⁵⁻¹⁶⁷.

Попытки применения этой же аппаратуры для фотометрии звезд и протяженных объектов не дали положительного результата^{168, 169}. Хорошая точность измерений

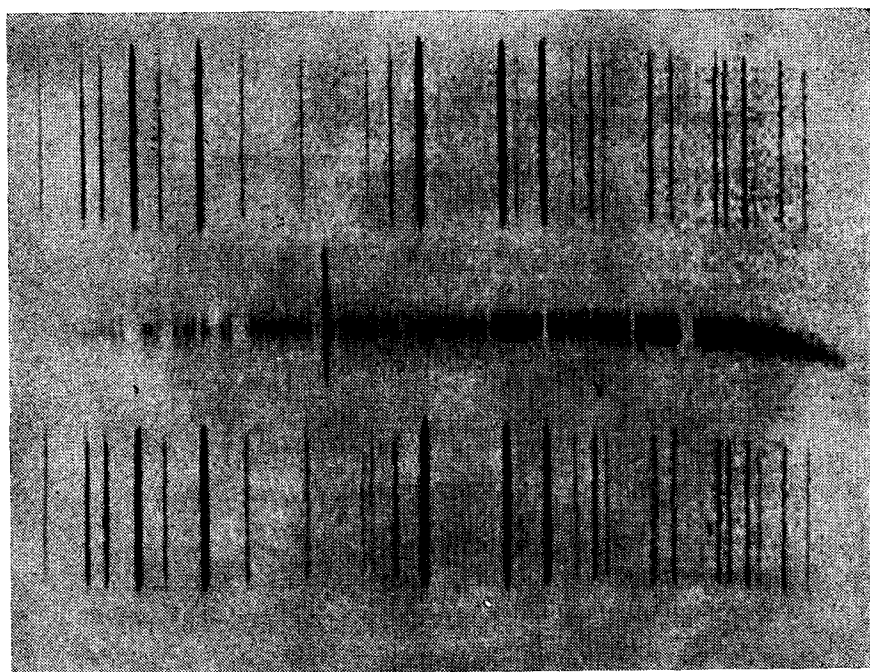


Рис. 14. Цифровое изображение спектра квазара PHL-957, полученное с помощью секона на 5-метровом телескопе.

Мелкие прямоугольники на рисунке являются элементами изображения, причем их ширина соответствует $1/3$ разрешающей способности ($0,075 \text{ нм}$) аппаратуры. Вертикальная шкала растянута в 4,8 раза. Спектр сравнения (сверху и снизу) — железная дуга. Эмиссионная линия слева от центра снимка — линия ртути $\lambda 435,83 \text{ нм}$. Несколько групп темных прямоугольников — дефекты мишени секона. Снимок получен в лаборатории путем модуляции светового потока лампочки цифровыми данными интенсивности спектра квазара.

яркости может быть получена лишь при очень тщательном исследовании каждого экземпляра секона и обработке видеоданных в ЭВМ.

4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СЧЕТА ФОТОНОВ С ПОМОЩЬЮ КАСКАДНОГО ЭОП В СОЧЕТАНИИ С ТЕЛЕВИЗИОННЫМИ СИСТЕМАМИ И ЭВМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ СЛАБЫХ ГАЛАКТИК И КВАЗАРОВ

Идея создания телевизионных систем на основе счета фотонов с использованием каскадного ЭОП состоит в том, что с помощью телевизионной системы осуществляется счет сцинтилляций на выходном экране ЭОП. Первое сообщение о возможности создания таких установок с применением диссектора было опубликовано в 1970 г.¹⁷⁰ Каскадный ЭОП использовался как усилитель яркости и как элемент промежуточной памяти. В последующие годы появилось описание ряда установок, в которых для счета сцинтилляций на экране ЭОП использовались различные передающие трубки сравнительно невысокой чувствительности (диссектор, секон, плюмбикон), входящие в стандартную аппаратуру для счета частиц¹⁷¹⁻¹⁷⁴. Для астрономических наблюдений сейчас наиболее широко применяются две системы: система Ликской обсерватории (США) и система Боксенберга, разработанная в Англии.

Аппаратура Ликской обсерватории^{175, 177} предназначена для проведения спектральных исследований слабых звезд и туманностей. Она была установлена в каскадно-гренновском фокусе 3-метрового Ликского телескопа в августе 1971 г. Все управление ею сосредоточено в темном светлом помещении, где во время наблюдений находятся астроном и оператор. В передающей камере установлены трехкамерный ЭОП с элек-

тростатической фокусировкой и волоконными планшайбами на входе и выходе и дис-сектор с магнитной фокусировкой. Между собой трубки соединены длинной связкой волоконной оптики. При наблюдениях ЭОП (входной фотокатод мультищелочной) охлаждается путем прокачки холодного эфира по трубке, расположенной вокруг него. Спектрограф имеет две щели: на одну наводится изображение звезды, а вторая используется для регистрации спектра ночного неба. Видеоинформация от каждого спектра поступает по 2048 каналам в ЭВМ с оперативной памятью 4096 слов по 24 бит, где накапливается. Там же производится вычитание сигнала, накопленного от спектра фона неба, из суммарного сигнала от спектра звезды и фона неба. В ЭВМ происходит предварительная обработка информации: линеаризация шкалы длин волн, учет экстинкции и т. д. После этого результат может быть записан на магнитной ленте, диске или передан по телетайпу на другую ЭВМ для дальнейшей обработки. Действующая квантовая эффективность аппаратуры Ликской обсерватории составляет 2—3%¹⁷⁷. Довольно низкая ее величина, по мнению авторов, объясняется тем, что из-за трудности согласования времени высвечивания выходного экрана ЭОП и времени сканирования поля некоторые сцинтилляции могут быть пропущены при счете, а некоторые сосчитаны многократно. Вследствие этого отношение сигнал — шум на выходе падает. Попытки повышения вероятности однократного счета не дали существенных результатов¹⁷⁸.

С помощью этой аппаратуры на 3-метровом телескопе Ликской обсерватории в течение последних лет было проведено большое количество астрофизических исследований звезд, галактик, квазаров и радиоисточников. Были получены спектры двух слабых галактик, находящихся вблизи квазара PKS 2251+11, которые показали, что красное смещение всех трех объектов одинаково¹⁷⁹. Это подтвердило предположение, что они образуют физически связанную группу. Были получены спектры пары голубых объектов с блеском 17^m и 19^m, расположенных на угловом расстоянии 4",8 друг от друга и известных как двойной квазар¹⁸⁰. Оказалось, что красное смещение у них сильно различается и они не могут образовывать физически связанную пару. Было определено красное смещение радиогалактики 3C 229, имеющей блеск 18^m,5¹⁸¹; проведена спектрофотометрия галактик Top 524 а, б (16^m,6 и 18^m,4), показавшая, что оба объекта являются галактиками типа Сейферта и имеют почти одинаковое красное смещение¹⁸². Было найдено красное смещение яркого квазара и пяти галактик вблизи радиоисточника RN8; оказалось, что объект и три галактики имеют одинаковое красное смещение и, по-видимому, образуют группу¹⁸³. Спектры пяти компактных членов группы Шахбазян 1, показали, что все они имеют одинаковое красное смещение¹⁸⁴. Изучение спектров нескольких слабых звезд типа RR Лир в звездном скоплении M22 проводилось с целью определения обилия металлов в этом скоплении¹⁸⁵.

Спектры квазара Top 256, полученные на разных расстояниях от его ядра (две и четыре угловые секунды), показали, что объект состоит из квазароподобного ядра, заключенного в гигантскую эллиптическую галактику¹⁸⁶. С севера от 3C 48 была найдена эмиссия, имеющая красное смещение несколько большее, чем красное смещение объекта¹⁸⁷. На основании этого авторы отвергают гипотезу о гравитационной природе красного смещения у этого квазара.

Телевизионные системы на счете фотонов, аналогичные Ликской, применяются и в других местах. В Висконсинском университете подобная система используется с щельным спектрографом^{188, 189}. в Австралии — для получения спектров звезд¹⁹⁰. В обсерватории Мак-Дональд на тех же принципах создается двумерный фотометр¹⁹¹.

Система Боксенберга разработана в Лондонском университетском колледже на базе четырехкамерного ЭОП и телевизионной установки на плюмбиконе^{192—196}. Особенностью ее является использование специального процессора, расположенного между телевизионной камерой и ЭВМ. Он осуществляет регистрацию каждого фотоэлектрона с равным весом, исключает многоэлектронные шумовые сцинтилляции и повышает разрешающую способность по сравнению с аналоговым вариантом той же системы. Благодаря отказу авторов от использования волоконной оптики аппаратура имеет высокую чувствительность в ультрафиолетовой области спектра. Входной фотокатод ЭОП охлаждается. Действующая квантовая эффективность аппаратуры, как показали исследования, оказалась близкой к квантовой эффективности входного фотокатода¹⁹⁷. По сравнению с Ликской аппаратурой система Боксенберга имеет более высокую квантовую эффективность, дает лучшую фотометрическую точность и обеспечивает регистрацию спектра в более широком спектральном диапазоне (320—800 нм).

Система Боксенберга предназначена как для регистрации спектров, так и для использования в качестве двумерного фотометра. В последнем случае она может, согласно заявлению авторов, обеспечить 10⁶ полностью независимых одновременно работающих элементов. Информационная емкость системы ограничена свойствами используемой ЭВМ и, в принципе, может быть увеличена. В аппаратуре предусмотрена возможность получения звездных величин наблюдаемых объектов в любой фотометрической системе по наблюдаемому распределению энергии в их спектрах. Для этого потоку зарегистрированных фотоэлектронов на каждой длине волны задается определенный вес, и результат интегрируется.

Наблюдения с аппаратурой Боксенберга проводились в начале 1974 г. на телескопе им. Исаака Ньютона в Англии (диаметр зеркала 2,5 м). Были получены спектры квазара 3С 273 и сейфертовской галактики NGC 4151 с дисперсией от 3 до 21 нм/мм. Спектральное разрешение доходило до 0,1 нм. Сравнение полученных результатов с данным сканов, сделанных для этих же объектов на 5-метровом телескопе на многоканальном спектрофотометре Ока, показали существенное преимущество аппаратуры Боксенберга^{198, 199}.

В октябре 1973 г. с той же аппаратурой были получены спектры квазара PKS 0237—23 на 5-метровом телескопе со спектральным разрешением 0,07 нм в области длин волн 373—430 нм. Наблюдения показали, что квазар имеет сложный спектр и ряд различных значений красных смещений²⁰⁰. В дальнейшем были получены спектры нормальных и пекулярных галактик, а также изучалась пространственная структура сейфертовских галактик²⁰¹.

Аналогичная телевизионная система построена в Италии. В ней использована стандартная телевизионная аппаратура на секоне. Система с использованием четырехкамерного ЭОП и секона со счетом фотонов разработана также на Стюардской обсерватории и установлена на 2,3-метровый телескоп²⁰².

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ С ТВЕРДОТЕЛЬНЫМИ ДАТЧИКАМИ ВИДЕОСИГНАЛА И ЭВМ ДЛЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОЛНЦА И ЗВЕЗД

Достижения современной микрорадиоэлектроники начинают играть существенную роль в развитии телевизионной техники. Разработаны и внедряются в практику твердотельные телевизионные фотоэлектрические приборы (ТТ ФЭП), являющиеся аналогами вакуумных передающих трубок^{203—208}. Создание в 1970 г. нового типа ТТ ФЭП, получившего название прибора с зарядовой связью (ПЗС), обеспечило быстрый прогресс в создании твердотельных датчиков видеосигнала. На базе кристалла кремния оказалось возможным создать сравнительно недорогие ПЗС-структуры, в которых имеются как светочувствительные элементы, так и сдвиговые регистры, обеспечивающие последовательное преобразование пачек зарядов в видеосигнал. В настоящее время созданы двумерные матрицы, с успехом заменяющие вакуумные передающие трубки малой чувствительности^{209—210}.

ТТ ФЭП обладают рядом свойств, делающих их весьма ценными приборами для астрофизических исследований²¹¹. Они имеют абсолютную геометрическую точность, не требуют дополнительной регулировки и фокусировки в процессе эксплуатации. Область их спектральной чувствительности простирается от видимой до ближней инфракрасной. Квантовый выход используемого в них внутреннего фотоэффекта составляет 80% в максимуме спектральной чувствительности, находящемся около 800 нм. Правда, пока еще не удается реализовать такую высокую квантовую эффективность из-за высоких шумов приборов, эквивалентных сотням и тысячам носителей зарядов. ТТ ФЭП легко стыкуются с интегральными схемами и ЭВМ. Появляется возможность использования современных методов статистической обработки информации, оптимизации параметров разложения изображения и создания автоматически работающих телевизионных систем. ТТ ФЭП являются строго линейными приборами. Отклонение от линейности находится на пределе точности измерений. Динамический диапазон приборов очень высок и в ряде случаев достигает 10^5 . Благодаря этому ТТ ФЭП обеспечивает высокую точность измерения светового потока²¹².

Для астрономических наблюдений применяются три типа ТТ ФЭП: интегрирующие диодные матрицы, или самосканирующие диоды, приборы с зарядовой связью (ПЗС) и матрицы на основе инжекции зарядов. Они отличаются друг от друга лишь методом считывания накопленной видеоинформации.

Интегрирующие диодные матрицы (IDA) часто называют системами «ретикон» по названию изготовляющей их фирмы. Они имеют большую накопительную емкость, хорошую линейность, малый поперечный ток между элементами и высокую чувствительность в синей области спектра вплоть до 310 нм. Конструктивно они выполняются обычно в виде линейных устройств, причем размер фотодиодов составляет 25×600 мкм. Двумерные устройства из самосканирующих фотодиодов оказались менее эффективными, чем другие приборы, и практического использования не нашли.

Линейки самосканирующих фотодиодов являются очень удобными приборами для проведения астрофизических исследований Солнца, так как для спектрогелиографов и магнитографов нужны приемники света в виде щели, выделяющей одну спектральную линию или ее часть. Поэтому сразу после появления промышленных образцов ретикона они были использованы в нескольких обсерваториях для разработки новых систем магнитографов и спектрогелиографов.

На обсерватории Китт-Пик был создан и успешно используется сейчас для наблюдений магнитограф на ретиконе²¹³. В нем применяются две линейки по 512 диодов в каждой. Рабочая температура ретикона во время наблюдений поддерживается около

$+5^{\circ}\text{C}$ специальным устройством. Для осушки применяется сухой азот. Сравнение чувствительности магнитографа с самосканирующими диодами и магнитографа с применением сорока ФЭУ, работавшего на той же обсерватории с 1970 г., показало, что благодаря увеличению числа каналов общая чувствительность прибора увеличилась примерно в 15 раз. Наименьший регистрируемый на новом приборе контраст составляет $\Delta I/I = 3 \cdot 10^{-4}$. Благодаря повышению общей и контрастной чувствительности

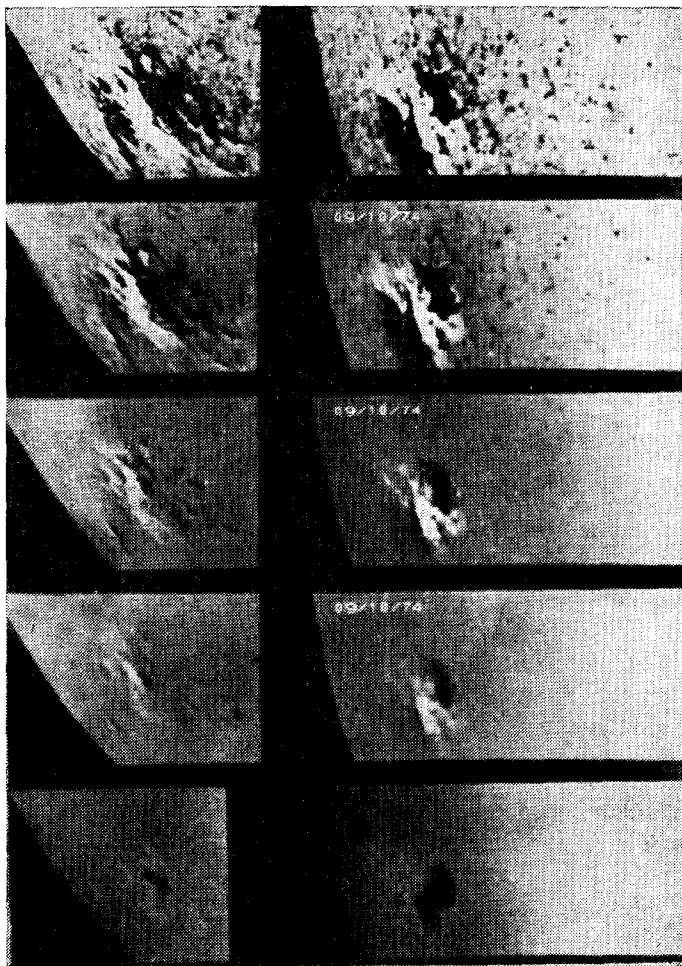


Рис. 15. Магнитограммы двух областей на солнечном диске, полученные на магнитографе обсерваторий Китт-Пик в диапазоне 2—2000 Г.

Все четыре отпечатка (сверху) сделаны с одной магнитограммы, при разном усилении 1 : 2 : 4 : 16 воспроизведения изображения. Нижние снимки — фотографии тех же областей в видимой области спектра.

магнитографа появилась возможность регистрации мелкомасштабной структуры магнитного поля не только в активных, но и в спокойных областях на Солнце (рис. 15).

На солнечной обсерватории Логхид в Калифорнии разработан магнитограф на ретиконе-512, работающем при температуре -40°C ²¹⁴. Каждый скан в приборе оцифровывается, причем слово имеет 24 *бит*. При насыщенной емкости диодов отношение сигнал — шум достигает 2000 : 1. Для наблюдений используется 17-см рефлектор и светофильтр с полосой пропускания 0,02 нм. Время, необходимое на получение одной магнитограммы (683 × 512 элементов), равно 5 мин.

На ряде обсерваторий были проведены опыты по использованию ретикона для звездной спектроскопии. В Канаде ретикон испытывался в спектрографе, установленном в кассегреновском фокусе 2,2-метрового телескопа^{215, 216}. При использовании

решетки в спектрометре получена точность измерений 1% ²¹⁷. Испытания решетки-128 для звездной спектроскопии в Аризонском университете показали, что он пригоден лишь для наблюдений спектров звезд средней яркости ²¹⁸.

На обсерватории Мак-Дональд был разработан и испытан на 0,9-метровом телескопе спектрограф на решетки-256 для наблюдений в области спектра от 430 до 960 нм ²¹⁹. Спектрограф управляется небольшой ЭВМ, на которой производится и предварительная обработка полученных данных. По сравнению со сканером, работающим на ФЭУ с кислородно-цезиевым фотокатодом, спектрограф с решеткой дает 100-кратный выигрыш за счет многоканальности. На 0,9-метровом телескопе было получено спектральное распределение энергии в спектрах ряда звезд. Проницающая способность составила 12^m,5 для звезд позднего спектрального класса при дисперсии 80 нм/мм за время экспозиции два часа и при точности измерений 1%. На обсерватории Серро-Тололо в Чили также применяли решетку для спектральных наблюдений в инфракрасной области спектра ²²⁰.

Астрономические исследования, выполненные с помощью решетки, пока еще очень скудны. Были получены спектры областей ионизованного водорода с целью аккуратного определения отношения интенсивностей линий и выявления слабых деталей ²²¹. Наблюдения линии водорода H_{α} рентгеновского источника Лебедь X-1 позволили обнаружить крылья малой интенсивности ²²².

Во всех упомянутых выше работах решетку использовался для регистрации достаточно больших световых потоков, где надо было получить высокую точность измерений. В тех случаях, когда стоит задача регистрации малых световых потоков, чувствительность решетки является недостаточной, и для дополнительного усиления света перед ним приходится использовать либо ЭОП с большим усилением, как это было сделано в институте им. Макса Планка ²²³ и Мичиганском университете ²²⁴, либо микроканальные пластины ²²⁵, ²²⁶.

Твердотельные матрицы на принципе переноса зарядов являются двумерными приемниками света ²²⁷. Они имеют комбинированную строчно-кадровую организацию переноса накопленных зарядов из светочувствительного массива в массив памяти и двухтактовую схему подачи коммутирующих импульсов. Частотно-контрастные характеристики у них несколько различаются по горизонтали и вертикали. Недостатком этих матриц является поперечный ток между элементами, уменьшающий контраст мелких деталей. Есть сообщения, что разработана матрица, способная заменить кремниевую ²²⁸. Конструктивно фотоматрица с цепями управления и первичного усиления сигнала выполнена в керамическом корпусе с 24 вводами и оптическим входным окном. Минимальная освещенность, при которой она работает, составляет 10⁻² лк.

Работы по применению матриц с переносом заряда в астрономии начаты в нескольких обсерваториях. В обсерватории Китт-Пик по программе разработки панорамных приемников света для астрономического использования проведены испытания ПЗС на 4-метровом телескопе ²²⁹. На обсерватории Принстонского университета разработана камера для наблюдений слабых протяженных объектов в красной области спектра. Камера испытывалась на 0,9-метровом телескопе. С ее помощью проведена поверхностная фотометрия трех галактик в области длин волн от 500 до 1000 нм с использованием пяти светофильтров с полупропусканием 100 нм ²³⁰. Лоуренс и др. использовали матрицу с числом элементов 100 × 100 для регистрации рентгеновского излучения в области 0,1—2 нм ²³¹.

Повышение чувствительности приборов с ПЗС осуществляется применением электронно-оптического предусиления сигнала. В университете Мэриленда (США) разработан фотометр, в котором перед матрицей (100 × 100 элементов) установлен ЭОП с мультищелочным фотокатодом ²³². Фотометр, по заявлению авторов, регистрирует единичные фотоны. Им разработана также специальная техника, позволяющая расширить динамический диапазон аппаратуры до 10⁸.

Матрицы на основе инжекции зарядов (CID) имеют такую же чувствительность, как и ПЗС, однако передача контраста на мелких деталях здесь лучше, чем на ПЗС. Приборы с инжекцией зарядов имеют перекрестную адресацию коммутирующих импульсов по схеме совпадений их на соответствующих шинах с прямым выделением тока сигнала. Преимуществом этих приборов является возможность считывания без нарушения зарядов, что позволяет многократно получать одну и ту же информацию и, суммируя данные разных считываний, повышать отношение сигнал — шум.

Для астрономических наблюдений матрицы с инжекцией зарядов только начинают использоваться. В Кембридже (штат Массачусетс) разработан и испытан в астрономических условиях прибор, названный авторами спектрометром изображения ²³³, ²³⁴. Он предназначен для получения снимков больших планет в узких спектральных областях в диапазоне длин волн от 650 до 1100 нм. В качестве приемника света используется матрица CID, имеющая 100 × 100 элементов. Спектральная область шириной 1,5 нм выделяется с помощью оптико-акустического светофильтра, позволяющего произвольно сдвигать полосу пропускания в используемом спектральном участке. Пропускание светофильтра в максимуме полосы составляет 20%. Во время наблюдений матрица охлаждается путем прокачки около нее охлажденного углекислотой

спирта. При этом темновой ток падает и становится заметным лишь при экспозиции больше 5 мин. Объем памяти применяемой ЭВМ составляет 10^4 слов по 12 бит. В январе 1975 г. на 1,5-метровом телескопе проводились наблюдения Сатурна и Юпитера. Время экспозиции составляло 5 и 2 мин соответственно. Были получены снимки Сатурна в 12 участках спектра внутри полосы метана 890 нм. Наилучшее отношение сигнал — шум, достигнутое на этих снимках, составило 40.

На обсерватории Китт-Пик (США) для астрономического применения разработаны две камеры на матрицах с инжекцией зарядов 235 . Одна из них предназначена для использования в фурье-спектрометре, другая — для получения прямых снимков, а также для использования в солнечной и звездной спектроскопии. Матрица имеет 100×100 элементов и смонтирована внутри дьюара, охлаждаемого жидким азотом.

Для регистрации предельно слабых потоков перед матрицей устанавливается ЭОП, как это сделано, например, в Канаде 218 . Предполагается использовать матрицу, имеющую 188×244 элемента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы телевизионной электроники сейчас быстро развиваются. Создается большое число новых систем, многие из которых оказываются нежизненными и отмирают, не успев дойти до практического применения. При составлении обзора такие системы мы не рассматривали, отдав предпочтение приборам, с которыми были получены астрономические наблюдения. Как и во всякой быстро развивающейся отрасли, в методах телевизионной электроники трудно пока предсказать, какие из применяющихся сейчас систем и передающих приборов окажутся более перспективными. В этом смысле интересно сравнение нескольких типов передающих трубок, которое было проведено Теодором и Пикелсом в лабораторных условиях по единой методике 236 . Для исследования авторы выбрали наиболее высокочувствительные трубки, имеющие каскад электронно-оптического преобразования сигнала. На рис. 16 приведены два полученных ими графика. Результаты авторы представили в виде таблицы с грубой оценкой качества трубок для различных критериев сравнения 236 . Важные для астрофизических исследований критерии мы приводим в табл. II, добавив данные по квантовой эффективности, фотометрическим свойствам и сложности настройки режима трубок. Сравнение результатов показывает, что для наземных астрофизических исследований наилучшей трубкой является изокон. Однако в других условиях выгоднее использовать секон или кремнийкон.

Применение методов телевизионной электроники в астрономии идет сейчас по пути создания специализированных телевизионных систем, разработанных для решения той или иной задачи наблюдательной астрономии. Так, суперортикон и изокон наилучшим образом подходят для патрульных и поисковых работ, когда требуется большое количество снимков областей неба небольшого размера с наибольшим временным разрешением. Телевизионные системы с кремниконом малочувствительны, но просты в настройке и дают высокую точность измерения светового потока. Они пригодны для регистрации малоконтрастных деталей достаточно ярких объектов. Секон удобен для использования в космосе благодаря возможности длительного накопления информации на его мишени. В наземных условиях он используется для гидирования и отождествления астрономических объектов, а также в сочетании с ЭОП для определения лучевых скоростей галактик и квазаров. Техника фотометрирования с помощью секона сложна. Системы со счетом сцинтилляций на выходном экране каскадного ЭОП были созданы для спектральных исследований. Они обладают высокой квантовой эффективностью, но громоздки и неудобны в эксплуатации. Особое положение занимают системы с ТТ ФЭП. Эти передающие приборы появились сравнительно недавно, и их первое применение в астрономии оказалось успешным. Основное их преимущество — линейность отклика в широком диапазоне и отсутствие геометрических искажений. Недо-

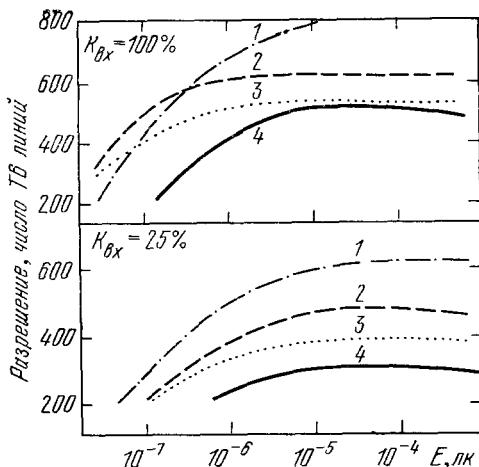


Рис. 16. Зависимости разрешающей способности изокона (1), кремникона с большой (2) и малой мишенью (3) и секона (4) от уровня освещенности входного фотокатода.

Контраст изображения на входе равен 100% (верхний график) и 25% (нижний график).

Таблица II

Сравнение различных типов передающих телевизионных трубок
с каскадом ЭОП на входе

Критерии сравнения	Передающие трубки с каскадом ЭОП		
	изокон	кремникон	секоп
Разрешение	5	4	2
Контрастная чувствительность	5	4	2
Опасность повреждения при больших освещенностях	5	4	2
Квантовая эффективность	5	4	2
Фотометрия	5	5	3
Расплывание яркого изображения	5	4	2
Размеры, вес, мощность	2	5	5
Сложность настройки	3	5	5
Обозначения: 5 — отлично, 4 — хорошо, 3 — посредственно, 2 — плохо.			

статок — высокий уровень шумов, уменьшающийся лишь при глубоком охлаждении. Чувствительность их пока невелика, и для наблюдений слабых объектов они используются в сочетании с несколькими каскадами ЭОП.

Отметим, что телевизионный метод астрономических наблюдений не заменяет ни один из существующих методов, но дает в руки исследователя новые возможности. Хорошо изучив их, можно с успехом решать ряд новых задач современной астрофизики.

Дальнейший прогресс в астрономических, астрофизических и космических исследованиях с применением методов телевизионной электроники в большой степени будет определяться успехами в быстро развивающихся областях физической электроники. Актуальной задачей, вставшей перед астрономами, является быстрое освоение новых достижений микрорадиоэлектроники и внедрение их в практику астрономических наблюдений.

В заключение автор благодарит И. В. Лебедева, П. В. Щеглова, В. К. Прокофьева, В. Б. Никонова, Н. Д. Галинского и А. Н. Абраменко за ценные замечания, высказанные ими при чтении рукописи.

Крымская астрофизическая обсерватория
АН СССР

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы.—[М.: Высшая школа, 1974.
2. Вильдгрубе Г. С., Малахов И. К., Степанов Р. М., Урвалов В. А.—Техн. кино и тел., 1977, № 10, с. 42.
3. Гуревич С. Б. Эффективность и чувствительность телевизионных систем. М.; Л.: Энергия, 1964.
4. Щеглов П. В. Электронная телескопия.— М.: Физматгиз, 1963.
5. Прокофьева В. В. В кн. Методы исследования переменных звезд/Под ред. В. Б. Никонова.— М.: Наука, 1971, с. 167.
6. Kron G. E.—In: Methods of Experimental Physics. V. 12: Astrophysics/Ed. N. Carleton.— N. Y.; Lnd.: Academic Press, 1974.— Pt. A, P. 252.
7. Каскадные электронно-оптические преобразователи и их применение: Сб. статей/Под ред. М. М. Бутслова.— М.: Мир, 1965.
8. Бутслов М. М., Степанов Б. М., Фанченко С. Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях/Под ред. Е. К. Завойского.— М.: Наука, 1977.
9. Физическая электроника: Сб. статей./Под ред. Б. М. Степанова.— М.: Наука, 1976.
10. Соул Д. Электронно-оптическое фотографирование/Перев. под ред. В. К. Базарова, И. Ф. Усольцева.— М.: Воениздат, 1972.

11. Берковский А. Г., Гаванин В. А., Зайдель И. Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. М.: Энергия, 1976.
12. Мартынов Д. Я. Курс практической астрофизики. М.: Наука, 1977.
13. Лебедева В. В. Техника оптической спектроскопии. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977.
14. De Witt J. — *Adv. Electron and Electron Phys.*, 1962, v. 16, p. 419.
15. Huneke J., Barton G., Aikens R., Powers W. — *Ibid.*, p. 409.
16. Агапов Е. С., Анисимов В. Ф., Никонов В. Б., Прокофьева В. В., Синенко С. М. — *Изв. Крым. астрофиз. общ.*, 1963, т. 30, с. 3.
17. Абраменко А. Н., Агапов Е. С., Анисимов В. Ф., Ефимов Ю. С., Прокофьева В. В., Синенко С. М. — *Ibid.*, 1965, т. 33, с. 313.
18. Абраменко А. Н., Агапов Е. С., Анисимов В. Ф., Ефимов Ю. С., Никонов В. Б., Прокофьева В. В., Синенко С. М. — *ДАН СССР*, 1965, т. 161, с. 1999.
19. Агапов Е. С., Анисимов В. Ф., Киладзе Р. И., Синенко С. М., Хатисов А. Ш. — *Бюлл. Абастуман. астрофиз. общ.*, 1966, № 34, с. 127.
20. Абраменко А. Н., Прокофьева В. В. — In: *Non-Periodic Phenomena of Variable Stars: IAU Colloquium*. — Budapest: 1968. — P. 57.
21. Абраменко А. Н., Истомин Л. Ф., Прокофьева В. В. — *Изв. Крым. астрофиз. общ.*, 1970, т. 41/42, с. 388.
22. Ефимов Ю. С., Прокофьева В. В. — *Ibid.*, 1969, т. 39, с. 163.
23. Прокофьева В. В., Услибер С. И. — *Астрон. цирк.*, 1969, № 518, с. 1.
24. Прокофьева В. В., Ушакова Н. А., Абраменко А. Н., Дабашов А. К. — *Ibid.*, 1971, № 635, с. 7.
25. Телевизионная астрономия: Сб. статей / Под ред. В. Б. Никонова. — М.: Наука, 1974.
26. Carruthers G. R. — *Astrophys. and Space Sci.*, 1971, v. 14, p. 332.
27. Livingston W. — *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, 1973, v. 11, p. 95.
28. Dennison E. W. — *Science*, 1971, v. 174, p. 240.
29. Lowrance J. L., Zucchino P. — In: *Methods of Experimental Physics*. V. 12: *Astrophysics*. — N.Y.; Lnd.: Academic Press, 1974. — Pt. A, p. 227.
30. Абраменко А. Н. — *Астрон. цирк.*, 1968, № 476, с. 6.
31. Абраменко А. Н. — *Ibid.*, 1969, № 497, с. 3.
32. Абраменко А. Н. — *ПТЭ*, 1970, № 4, с. 191.
33. Walker G. A. H., Auman J. R., Buchholz V. L., Coldberg B. A., Gower A. C., Isherwood B. C., Knight R., Wright D. — *Adv. Electron. and Electron. Phys. Ser. B*, 1972, v. 33, p. 819.
34. Агапов Е. С., Александрин Ю. С., Анисимов В. Ф., Браунфельд С. Г., Киладзе Р. И., Матвеев Г. Д., Хатисов А. Ш., Чантурия С. М. — *Бюлл. Абастуман. астрофиз. общ.*, 1975, № 46, с. 251.
35. Абраменко А. Н., Прокофьева В. В. — *Переменные звезды*, 1971, т. 18, с. 157.
36. Прокофьев В. К. Фотографические методы количественного спектрального анализа металлов и сплавов. Ч. II: Методика. — М.; Л.: Гостехиздат, 1951.
37. Vaucouleurs G. de — *Appl. Opt.*, 1968, v. 7, p. 1513.
38. Миронов А. В., Петров П. П. — *Новая техника в астрономии*, 1975, вып. 5, с. 84.
39. Абраменко А. Н., Агапов Е. С., Анисимов В. Ф., Галинский Н. Д., Поляков М. А., Прокофьева В. В. — *Астрон. цирк.*, 1977, № 968, с. 1.
40. Абраменко А. Н., Прокофьева В. В., Ушакова Н. А. — *Изв. Крым. астрофиз. общ.*, 1974, т. 49, с. 98.
41. Jones R. C. — *Adv. Electron and Electron. Phys.*, 1959, v. 11, p. 87.
42. Fellgett P. B. — *Vistas in Astronomy*, 1955, v. 1, p. 475.
43. Сотников В. М., Фанченко С. Д. — В кн. *Диагностика плазмы*. — М.: 1968. — Т. 2, с. 145.
44. Buchholz V., Walker G. A. H., Auman J., Isherwood B. — In: *Proc. of Symposium on Astronomical Observations with TV-type Sensors* / Ed. J. W. Glaspey, G. A. H. Walker. — Vancouver, Canada: 1973. — P. 199.
45. Истомин Л. Ф. — *Астрон. цирк.*, 1967, № 448, с. 4.
46. Прокофьева В. В., Еписhev V. P. — *Inf. Bull. Var. Stars: Com.* 27 IAU, 1969, No. 376, p. 1.
47. Ивченко В. Н. — *Переменные звезды. Прил. 1*, 1971, № 3, с. 197.
48. Миронов А. В. — *Астрон. цирк.*, 1971, № 637, с. 1.
49. Прокофьева В. В., Ключков С. Н. — *Переменные звезды. Прил. 1*, 1971, № 2, с. 89.

50. Prokof'eva V. V., Abramenko A. N.— *Inf. Bull. Var. Stars*, 1976, No. 1219, p. 1.
51. Прокофьева В. В., Ерлексова Г. Е., Голландский О. П., Абраменко А. Н.— *Изв. Крым. астрофиз. obs.*, 1977, т. 56, с. 28.
52. Прокофьева В. В.— *Ibid.*, 1970, т. 41/42, с. 383.
53. Миронов А. В.— *Астрон. цирк.*, 1971, № 601, с. 3.
54. Петров П. П.— *Ibid.*, 1972, № 710, с. 1.
55. Петров П. П.— *Изв. Крым. астрофиз. obs.*, 1976, т. 54, с. 42.
56. Bakos G., Hunek J.— *Organ Mountain Station Dearborn Obs.*, Ann. Rept, 1963.
57. Абраменко А. Н., Прокофьева В. В.— *Изв. Крым. астрофиз. obs.*, 1967, т. 38, с. 252.
58. Hunek J. A.— *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1970, v. 2, p. 69.
59. Dunlap J. R., Hunek J. A., Powers W. T.— *Adv. Electron. and Electron Phys. Ser. B*, 1972, v. 33, p. 789.
60. Абраменко А. Н., Голландский О. П., Прокофьева В. В.— *Изв. Крым. астрофиз. obs.*, 1974, т. 49, с. 89.
61. Абраменко А. Н., Прокофьева В. В.— *Астрон. цирк.*, 1970, № 584, с. 6.
62. Абраменко А. Н., Голландский О. П., Прокофьева В. В.— *Ibid.*, 1972, № 708, с. 6.
63. Прокофьева В. В., Услибер С. И.— *Изв. Крым. астрофиз. obs.*, 1971, т. 43, с. 201.
64. Prokof'eva V. V., Abramenko A. N.— *Icarus*, 1974, v. 21, p. 191; 1975, v. 24, p. 379.
65. Абраменко А. Н., Наугольная М. Н., Прокофьева В. В. *Атлас телевизионных снимков Марса: (4 августа 1971 г.— 28 января 1972 г.)*.— М.: Наука, 1973.
66. Абраменко А. Н., Наугольная М. Н.— *Астрон. цирк.*, 1972, № 717, с. 3.
67. Прокофьева В. В., Ушакова Н. А., Абраменко А. Н., Дабыхов А. К.— *Изв. Крым. астрофиз. obs.*, 1973, т. 47, с. 139.
68. Прокофьева В. В.— *Астрон. цирк.*, 1972, № 720, с. 4.
69. Прокофьева В. В., Фенчак В. А.— *Ibid.*, 1972, № 717, с. 5.
70. Прокофьева В. В., Чупракова Т. А., Дзямко С. С., Брызгалова Т. В.— *Астрон. ж.*, 1975, т. 52, с. 623.
71. Прокофьева В. В., Фенчак В. А.— *Астрон. вестн.*, 1975, т. 9, № 4, с. 201.
72. Ливингстон У.— В кн. *Методы астрономии* / Под ред. В. А. Хилтера.— М.: Мир, 1967.— С. 285.
73. Купрович Н. Ф.— *Новая техника в астрономии*, 1975, вып. 5, с. 82.
74. Парфиненко Л. Д.— *Солнечные данные*, 1972, № 6, с. 95.
75. Ленцман В. Л., Парфиненко Л. Д.— *Ibid.*, 1976, № 6, с. 80.
76. Ленцман В. Л., Парфиненко Л. Д.— *Ibid.*, 1975, № 12, с. 93.
77. Walker G. A. H., Auman J. R., Buchholz V., Goldberg B., Isherwood B.— *Publ. Royal. Obs. Edinburg.*, 1971, v. 8, No. 11, p. 86.
78. Glaspey J., Eilek J., Fahlman G., Auman J.— *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1976, v. 8, p. 24.
79. Eilek J. A., Auman J. R., Ulrich T. J., Walker G. A. H., Kuhi L. V.— *Astrophys. J.*, 1973, v. 182, p. 363.
80. Агапов Е. С., Анисимов В. Ф., Можжерин В. М., Никонов В. Б., Прокофьева В. В., Пергамент В. И., Синенко С. М.— *Космич. исслед.*, 1965, т. 3, с. 630.
81. Агапов Е. С., Анисимов В. Ф., Браунфельд С. Г., Можжерин В. М., Прокофьева В. В., Синенко С. М.— В кн. *Материалы 16-го Международного конгресса по астронавтике*.— Афины: 1965.— С. 307.
82. Thomas S. P.— *Space Aeron.*, 1967, v. 11, p. 75.
83. Галкина Т. С., Прокофьева В. В.— *Наблюдения ИСЗ*, 1966, № 5, с. 201.
84. Матягин В. С., Усольцева Л. А., Шипенштейн А. А.— *Астрон. цирк.*, 1972, № 727, с. 6.
85. Анисимов В. Ф., Браунфельд С. Г., Галкина Т. С., Доброправин П. П., Можжерин В. М., Прокофьев В. К., Черных Н. С.— *Изв. Крым. астрофиз. obs.*, 1970, т. 41/42, с. 388.
86. Доброправин П. П., Можжерин В. М., Прокофьев В. К., Черных Н. С.— *Ibid.*, 1970, т. 41/42, с. 400.
87. Кондратьева С. П., Самонов В. С., Шаргородский В. Д., Шокин Ю. А.— *Земля и Вселенная*, 1969, № 3, с. 33.

88. Hicks G. F., Barton G. G., Dumback W. E.— *Smithsonian. Contr. Astrophys.*, 1967, v. 11, p. 95.
89. Spalding I., Colter G., Негменвай С. L., Coll F. A., Dungan J. E.— *Ibid.*, 1962, v. 7, p. 237.
90. Гульмедов Х., Бегханов М., Поляков М. А., Хрущев Л. И.— *Астрон. цирк.*, 1971, № 607, с. 6.
91. Бегханов М., Гульмедов Х., Поляков М. А., Мухамедназаров С.— *Ibid.*, 1972, № 690, с. 6.
92. Анисимов В. Ф., Гульмедов Х. Д., Мухамедназаров С.— *Астрон. вестн.*, 1976, т. 10, № 2, с. 124.
93. Бегханов М., Гульмедов Х., Мухамедназаров С., Гунько В.— *Ibid.*, 1974, т. 8, № 1, с. 49.
94. Гульмедов Х., Мухамедназаров С., Смирнов В. А.— *Астрон. цирк.*, 1974, № 849, с. 7.
95. Анисимов В. Ф., Гульмедов Х. Д., Мухамедназаров С., Смирнов В. А.— *Астрон. вестн.*, 1976, т. 10, № 3, с. 158.
96. Мухамедназаров С., Смирнов В. А.— *Астрон. цирк.*, 1976, № 916, с. 3.
97. Овезгельдыев О., Мухамедназаров С., Гульмедов Г.— *Изв. АН Туркм. ССР. Сер. физ.-техн., химич. и геол. наук*, 1976, № 4, с. 57.
98. Мухамедназаров С. Автореферат кандидатской диссертации.— Ашхабад: ФТИ АН Туркм. ССР, 1977.
99. Купрович Н. Ф.— *Изв. Гл. астрон. обс. Пулково*, 1971, № 186, с. 72.
100. Парфиненко Л. Д.— *Солнечные данные*, 1973, № 1, с. 76.
101. Абраменко А. Н., Прокофьева В. В.— *Изв. Крым. астрофиз. обс.*, 1966, т. 35, с. 289.
102. Абраменко А. Н., Прокофьева В. В.— В кн. *Атмосферная оптика: Сб. статей.*— 1968.— С. 45.
103. Анисимов В. Ф., Бердина Р. Н., Нечаева Н. Н., Николаев П. В., Рожнова И. П.— *Ibid.* — С. 37.
104. Beaver E. A., McIlwain C. E.— *Rev. Sci. Instr.*, 1971, v. 42, p. 1321.— Имеется перевод: *Приборы науч. иссл.* 1971, № 9, с. 38.
105. Beaver E. A., McIlwain G. E., Choisser J. P., Wysoczanski W.— *Adv. Electron. and Electron. Phys. Ser. B*, 1972, v. 33, p. 863.
106. Beaver E. A.— *Цитир. в ⁴⁴ сб.* — P. 55.
107. Beaver E. A., Burbidge E. M., McIlwain C. E., Epps H. W., Strittmatter P. A.— *Astrophys. J.*, 1972, v. 178, p. 95.
108. Choisser J. P.— In: *IAU Colloquium No. 40: Astronomical Applications of Image Detectors with Linear Respons*/Ed. M. Duchesne, G. Lelievre.— Paris: don Observatory, 1976.— 27.
109. Tull R. G.— *Цитир. в ¹⁰⁸ сб.*— Доклад 23.
110. Tull R. G., Choisser J. P., Snow E. H.— *Appl. Opt.*, 1975, v. 14, p. 1182.
111. Smith M. A., Parson S. B.— *Astrophys. J.*, 1976, v. 205, p. 430.
112. Smith M. A.— *Ibid.*, 1976, v. 208, p. 487.
113. Зазерская В. И., Ямпольский Л. Я.— *Техн. кино и тел.*, 1973, № 8, с. 77.
114. Crane P., Davis M.— *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1973, v. 87, p. 207.
115. Title A. M.— *Solar Physic*, 1974, v. 35, p. 233.
116. McCord T. B., Westphal J. A.— *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1971, v. 3, p. 466.
117. McCord T. B., Westphal J. A.— *Appl. Optics*, 1972, v. 11, p. 522.
118. McCord T. B., Bosel J.— *Цитир. в ⁴⁴ сб.*— P. 137.
119. McCord T. B., Frankston M. J.— *Appl. Optics*, 1975, v. 14, p. 1437.
120. McCord T. B., Bosel J. B., Frankston M. J.— In: *Proc. of Conference on Image Processing Technique in Astronomy*/ Ed. C. de Jager, H. Nienwenhuijzen.— Dordrecht, Holland; Boston, USA: 1975.— P. 91.
121. Westphal J. A., Kristian J.— *Цитир. в ¹⁰⁸ сб.*— Доклад 19.
122. Aikens P. S., Lasker B. M.— *Цитир. в ⁴⁴ сб.*— P. 65.
123. Honeycutt R. K., Barkhead M. S.— *Ibid.*— P. 229.
124. Landman D. A., Orrall F. Q., Zane R.— *Ibid.*— P. 255.
125. Adams J. B., Pieters C., McCord T. B.— In: *Proc. of 5th Lunar Science Conference Houston.*— Texas: 1974.— P. 171.
126. Miyashiro S., Shirouzu S.— *Adv. Electron. and Electron. Phys. Ser. A*, 1972, v. 33, p. 207.
127. Santilli V. J., Conger G. B. III — *Ibid.*, p. 219.
128. Westphal J. A.— *Цитир. в ⁴⁴ сб.*— P. 127.

129. Westphal J. A., Kristian J., Sandage A.—*Astrophys. J.*, 1973, v. 127, p. L95.
130. Sandage A., Kristian J., Westphal J. A.—*Ibid.*, 1976, v. 205, p. 688.
131. Colgate S. A., Moor E. P., Colburn J.—*Appl. Optics*, 1975, v. 14, p. 1429.
132. Fehrenbach Ch., Vin A.—*Цитир. в* ¹²⁰ сб.— P. 109.
133. Mackay C. D.—*Ibid.*— P. 125.
134. Gilbert G. R., Angel J. R. P., Grandi S.—*Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1974, v. 86, p. 600.
135. Dommange J.—*Цитир. в* ¹²⁰ сб.— P. 343.
136. Blazit A., Koechlin L., Oneto J. L.—*Ibid.*— P. 79.
137. Ingerson T. E., Lasker B. M., Osmer P. S.—*Цитир. в* ¹⁰⁸ сб.— Доклад 20.
138. Sandford M. T., Gow Ch. E., Jekowski J. P.—*Sci. News*, 1975, v. 108, p. 342.— См. также: Приборы для науч. иссл., 1976, № 4, с. 87.
139. Gow Ch. E. et al.—*Цитир. в* ¹⁰⁸ сб.— Доклад 21.
140. Sandford M. T., Gow Ch. E., Jekowski J. P.—*Rev. Sci. Instrum.*, 1976, v. 47, p. 486.
141. Sandford M. T., Gow Ch. E., Honeycutt R. K., Jekowski J. P., Olivass P. N.—*Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1977, v. 89, p. 31.
142. Goetze G. W.—*Adv. Electron and Electron Phys. Ser. A*, 1966, v. 22, p. 219.
143. Doughty D. D.—*Ibid.*, p. 261.
144. Венедиктов Н. Я., Малахов И. Н.—*Техн. кино и тел.*, 1968, № 7, с. 72.
145. Whipple F. L., Davis R. J.—*Astrophys. J.*, 1960, v. 65, p. 285.
146. Goetze G. W., Boerio A. H.—*Proc. Inst. Electron Eng.*, 1964, v. 52, p. 1007.
147. Zucchini P. M., Lowrance J. L.—*Adv. Electron. and Electron Phys. Ser. B*, 1972, v. 33, p. 801.
148. Davis R. J., Deutschman W. A., Haramundanis K., Nozawa Y., O'Neill K.—*In: Proc. of Symposium on Astronomical Use of TV-type Image Sensor/Ed. V. R. Boscarino — NASA SP-256*, 1971.— P. 137.
149. Deutschman W. A.—*Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1972, v. 84, p. 123.
150. Boksenberg A., Burgess D. E.—*Цитир. в* ⁴⁴ сб.— P. 21.
151. Crane Ph.—*Ibid.*— P. 391.
152. Carruthers G. R.—*Ibid.*— P. 261.
153. Green M., Hansen J. R.—*Adv. Electron. and Electron. Phys. Ser. B*, 1969, v. 28, p. 807.
154. Dennison E. W.—*In: Proc. of ESO/CERN Conference on Large Telescope Design.— Geneva: 1971.— P. 429.*
155. Dennison E. W.—*Adv. Electron. and Electron. Phys. Ser. B*, 1972, v. 33, p. 795; *цитир. в* ⁴⁴ сб.— P. 47.
156. Wampler E. J.—*Sci. and Technol.*, 1972, v. 28, p. 337.
157. Lowrance J. L., Zucchini P. M.—*Adv. Electron. and Electron. Phys. Ser. B*, 1969, v. 28, p. 851.
158. Zucchini P., Lowrance J.—*Цитир. в* ¹⁴⁸ сб.— P. 27.
159. Morton D. C.—*In: Proc. of ESO/CERN Conference on Auxiliary Instruments of Large Telescopes/Ed. S. Lausten, A. Reiz.— 1972.— P. 317.*
160. Morton D. C.—*Цитир. в* ⁴⁴ сб.— P. 193.
161. Lowrance J. L., Morton D. C., Zucchini P., Oke O. J. B., Schmidt M.—*Astroph. J.*, 1972, v. 171, p. 233.
162. Morton D. C., Richstone D. O.—*Ibid.*, 1973, v. 184, p. 65.
163. Morton D. C., Morton W. A.—*Ibid.*, 1972, v. 178, p. 607.
164. Morton D. C., Morton W. A.—*Ibid.*, 1972, v. 174, p. 237.
165. Morton D. C., Chevalier R. A.—*Ibid.*, p. 489.
166. Morton D. C., Chevalier R. A.—*Ibid.*, 1973, v. 179, p. 55.
167. Morton D. C., Thuan T. X.—*Ibid.*, 1973, v. 180, p. 705.
168. Crane Ph.—*Цитир. в* ⁴⁴ сб.— P. 391.
169. Davidson K., Crane Ph., Chincarini G.—*Astron. J.*, 1974, v. 79, p. 791.
170. McNall J. F., Robinson Z., Wampler E. J.—*Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1970, v. 82, p. 837.
171. Mende S. B.—*Цитир. в* ¹⁴⁸ сб.— P. 85.
172. McGee J. D., Morgan B. Z., Delori F. C., Airey R. W., Cullum M. J., Stephens C. Z.—*Adv. Electron. and Electron. Phys. Ser. B*, 1972, v. 33, p. 851.
173. Airey R. W., Delori F. C., McGee J. D., Morgan B. L.—*Цитир. в* ¹⁶⁹ сб.— P. 333.

174. McGee J. D., Airey R. W.— Цитир. в ⁴⁴ сб.— Р. 97.
175. Robinson L. B., Wampler E. J.— Publ. Astron. Soc. Pac., 1972, v. 84, p. 497.
176. Robinson L. B., Wampler E. J.— Цитир. в ⁴⁴ сб.— Р. 69.
177. Robinson L., Wampler E. J.— Цитир. в ¹⁰⁸ сб.— Доклад 14.
178. McNall J. F.— Цитир. в ⁴⁴ сб.— Р. 115.
179. Robinson L. B., Wampler E. J.— Astroph. J., 1972, v. 171, p. L83.
180. Wampler E. J., Baldwin J. A., Burke W. L., Robinson L. B., Hazard C.— Nature, 1973, v. 246, p. 203.
181. Spinrad H., Smith H.— Astroph. J., 1973, v. 179, p. L71.
182. Robinson L. B., Wampler E. J.— Ibid., p. L79.
183. Miller J., Robinson L., Wampler E. J.— Ibid., p. L83.
184. Robinson L. B., Wampler E. J.— Ibid., p. L135.
185. Butler D., Kraft R. P., Miller J., Robinson L.— Ibid., p. L73.
186. Silk J., Smith H., Spinrad H., Field G.— Ibid., 1973, v. 181, p. L25.
187. Wampler E. J., Robinson L. B., Burbidge E. M., Baldwin J. A.— Ibid., 1975, v. 198, p. L49.
188. McNall J. E., Michalski D. E., Miedaner T. Z.— Publ. Astron. Soc. Pac., 1972, v. 84, p. 145.
189. Anderson Ch. M.— Цитир. в ⁴⁴ сб.— Р. 217.
190. Disney M. J.— Proc. Astron. Soc. Australia, 1974, v. 2, No. 5, p. 282.
191. Rybski P. M., Vancitters G. W.— Цитир. в ¹⁰⁸ сб.— Доклад 34.
192. Boksenberg A.— Цитир. в ¹⁵⁹ сб.— Р. 295.
193. Boksenberg A., Burgess D. E.— Adv. Electron. and Electron. Phys. Ser. B, 1972, v. 33, p. 835.
194. Boksenberg A.— Цитир. в ¹⁴⁸ сб.— Р. 77.
195. Boksenberg A.— Цитир. в ¹²⁰ сб.— Р. 59.
196. Boksenberg A.— Цитир. в ¹⁰⁸ сб.— Доклад 13.
197. Fort B., Boksenberg A., Coleman C.— Ibid.
198. Boksenberg A., Shortridge K., Fosbury R. A. E., Penston M. V., Savage A.— Mon. Not. RAS, 1975, v. 172, p. 289.
199. Boksenberg A., Shortridge K., Allen D. A., Fosbury R. A. E., Penston M. V., Savage A.— Ibid., 1975, v. 173, p. 381.
200. Boksenberg A., Sargent W. L. W.— Astroph. J., 1975, v. 198, p. 31.
201. Boksenberg A.— Цитир. в ¹⁰⁸ сб.— Доклад 53.
202. Gilbert G. R.— Цитир. в ⁴⁴ сб.— Р. 83.
203. Золотарев В. Ф. Безвакуумные аналоги телевизионных трубок.— М.: Энергия, 1972.
204. Роуз А. Зрение человека и электронное зрение.— М.: Мир, 1977.
205. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника.— М.: Соз. радио, 1977.
206. Осинский В. И. Интегральная оптоэлектроника.— Минск: Наука и техника, 1977.
207. Воробьев А. М., Дронов А. С., Нерусин О. А., Равинский А. П.— Заруб. радиоэлектрон., 1973, № 9, с. 14.
208. Скориков В. А., Зеленцов А. В., Сельнов Е. С. Приборы с переносом зарядов: Электроника и ее применение. Т. 6.— М.: ВИНТИ, 1974.— (Итоги науки и техники.)
209. Rodgers W.— Electronics, 1974, v. 47, No. 6, p. 29.
210. Williams T.— Wireless World, 1975, v. 81, No. 1471, p. 113.
211. Livingston W. C.— Цитир. в ¹⁰⁸ сб.— Доклад 22.
212. Schumann J. D.— Ibid.— Доклад 31.
213. Livingston W. C., Harvey J., Slaughter C., Trumbo D.— Appl. Opt., 1976, v. 15, p. 40.
214. Smithson R. C.— Solar Phys., 1975, v. 40, p. 241.
215. Walker G., Glaspey J., Buchholz V., Lane-Wright D.— Bull. Am. Astron. Soc., 1976, v. 8, p. 24.
216. Walker G. A. H., Buchholz V., Fahlman G. G., Glaspey J. et al.— Цитир. в ¹⁰⁸ сб.— Доклад 24.
217. Weaver B., Love G.— Bull. Am. Astron. Soc., 1976, v. 8, p. 209.
218. Geary J. C., Gilbert G. R.— Ibid., 1975, v. 7, p. 432.
219. Tull R. G., Nather R. E.— Цитир. в ⁴⁴ сб.— Р. 171.
220. Ingerson T. E., Lackner B. M., Osmer P. S.— Цитир. в ¹⁰⁸ сб.— Доклад 20.
221. Condal A., Glaspey J., Walker G.— Bull. Am. Astron. Soc., 1976, v. 8, p. 24.
222. Glaspey J., C., Fahlman G., Walker G. A. H.— Ibid., p. 24.
223. Geary J. C., Beetz M. A., Fath D.— Цитир. в ¹⁰⁸ сб.— Доклад 29.

224. Shectman S. A., Hiltner W. A.— Publ. Astron. Soc. Pac., 1976, v. 88, p. 960.
225. McNell J. F., Nordsieck K. H.— Цитир. в ¹⁰⁸ сб.— Доклад 26.
226. Broadfoot A. L., Sandel B. R.— Ibid.— Доклад 34.
227. Livingston W. C.— Цитир. в ¹²⁰ сб.— P. 21.
228. Фридман А. Н., Яковлев С. Б.— Техн. кино и тел., 1977, № 8, с. 51.
229. Ford H.— Bull. Am. Astron. Soc., 1976, v. 8, p. 133.
230. Loh E. D., Prince U.— Ibid., p. 350.
231. Lowrance J. L., Zucchini P., Long K. S., Renda G.— Ibid., p. 246.
232. Currie D. G.— Цитир. в ¹⁰⁸ сб.— Доклад 30.
233. Wattson R., Harvey P., Swift R.— In: Proc. of Symposium Charge-Coupled Devices Technology Scientific Imaging Application.— 1975.— P. 70.
234. Wattson R. B., Rappaport S. A., Frederick E. E.— Icarus, 1976, v. 27, p. 417.
235. Aikens R. S., Harvey J. W., Lynds C. R.— Цитир. в ¹⁰⁸ сб.— Доклад 25.
236. Theodorou D. G., Pickels J. C.— Adv. Electron. and Electron. Phys. Ser. B. 1972, v. 33, p. 979.