

ДИОКОН-СПЕКТРОФОТОМЕТР. ОПИСАНИЕ СВЕТОПРИЕМНОЙ АППАРАТУРЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

В. С. Рылов

Даны описание и характеристики всех элементов, составляющих диокон-спектрофотометр (ДСФ-40). Конструктивно ДСФ-40 привязан к штатному светосильному спектрографу СП-160, который предназначен для БТА, или к универсальному спектрографу УАГС (ГДР), в связи с чем приведены конкретные сведения о них в сочетании с 40-канальным детектором фотонов — диоконом и характеристики диокона.

Рассмотрены методики фокусировки диокона в схеме ДСФ-40, выставления порогов дискриминации, отождествления спектра сравнения и вычисления шкалы длин волн и один из возможных способов первичной обработки полученных данных, включая кривую реакции всей системы.

В заключение даны результаты испытаний ДСФ-40 в лабораторных условиях и на телескопе. Данные показали высокую эффективность ДСФ-40 в регистрации слабых световых потоков. В лабораторных условиях была изучена стабильность диокона во времени при различных уровнях световых потоков.

Автор считает, что 40-канальный диокон может найти наиболее эффективное применение в спектрофотометрии и спектрополяриметрии при исследовании объектов слабой светимости.

Description and characteristics of all the elements of Digicon-spectrophotometer (DSP-40) are presented. In its construction the DSP-40 is attached to the fast spectrograph FS-160 of the 6-m telescope, or to the universal spectrograph UAGS (DDR), so we present their brief characteristics together with the characteristics of the 40-channel photon detector — Digicon.

The procedure of Digicon focusing in the DSP-40 scheme, setting the discriminating threshold, identification of the comparison spectrum and calculation of the wavelength scale, and one of the possible ways of preliminary data reduction, including the transfer curve of the whole system is considered.

In conclusion the results of testing the DSP-40 in the laboratory and at the telescope are presented. The results show the high efficiency of the DSP-40 in registering the faint light fluxes. The Digicon stability in time at different levels of light fluxes is studied in the laboratory.

The author considers that the 40-channel Digicon may be effectively used in spectrophotometry and spectropolarimetry for studying faint objects.

Спектрофотометр ДСФ-40 предназначен для астрофизических наблюдений с шириной спектрального интервала от 3 до 70 Å на каждый из 40 каналов. Он состоит из трех основных частей: спектрографа, диокона и системы съема и обработки данных. В качестве спектрографа могут применяться светосильный спектрограф СП-160, имеющий камеру с внешним фокусом и рабочим отрезком 13 мм, или универсальный спектрограф УАГС (продукция ГДР), также имеющий светосильную камеру с внешним фокусом. Поскольку диокон имеет перед фотокатодом рабочий габаритный отрезок 11 мм, то он хорошо стыкуется со спектрографом.

В табл. 1 даны значения обратных линейных дисперсий D , Å/мм, ширины спектральных интервалов $\Delta\lambda$ на один канал и спектральных диапазонов $\lambda_1-\lambda_2$, регистрируемых одновременно диоконом двух разновидностей: с шириной b канала и промежутка Δb между каналами.

Смена дифракционных решеток в обоих спектрографах занимает не более 10 мин и может быть сделана в процессе наблюдений, для установки диокона на спектрограф, включая фокусировку, требуется до 2 ч. Оптическая камера СП-160 имеет фокусное расстояние 200 мм, относительное отверстие 1:2 и рабочий отрезок 13 мм; камера УАГС имеет фокус 150 мм с относительным отверстием 1:2 и рабочим отрезком 13 мм. К недостаткам камеры УАГС сле-

дует отнести низкое пропускание, почти в 2 раза меньшее, чем у камеры СП-160, причем к краю поля пропускание падает быстрее, чем в камере СП-160. Для случаев применения диокона на других телескопах полезно продолжить сравнение характеристик УАГС и СП-160. Визуальный гид СП-160 имеет рабочее поле 40 мм и характеризуется малыми потерями света при переносе изображения щели в глаз наблюдателя. Поле гида УАГС в 3 раза меньше, а его оптика недостаточно светосильна, чтобы собирать весь свет, который падает на щелки щели от телескопа с относительным отверстием 1 : 4. Методика удержания с помощью плоскопараллельной пластины изображения объекта на входной щели СП-160 более эффективна и в итоге приводит к меньшим потерям света на щели, хотя на пластине теряется около 8 % света. УАГС нуждается в гидировании телескопом, а такой способ, если телескоп большой и массивный, дает худшие результаты.

На рис. 1 дана оптическая схема ДСФ-40, из которой следует, что ось оптической камеры, совпадающая с осью диокона, близка по направлению к опти-

ТАБЛИЦА 1
Дисперсии D , интервалы $\Delta\lambda$, диапазоны $\lambda_1-\lambda_2$ для СП-160

Ширина ($b + \Delta b$), мм	Величина	Дифракционная решетка с числом штр/мм			
		200	300	600	1200
0.11	$D, \text{Å/мм}$	185	115	60	30
	$\Delta\lambda, \text{Å}$	20	12	6.5	3
	$\lambda_1-\lambda_2, \text{Å}$	813	505	263	132
0.375	$\Delta\lambda, \text{Å}$	72	41	22	11
	$\lambda_1-\lambda_2, \text{Å}$	2775	1725	900	450

ческой оси телескопа в первичном фокусе. Такое размещение светоприемника на спектрографе в кабине первичного фокуса БТА представляет большие удобства для наблюдателя. И еще, в отличие от УАГС в СП-160 искатель и гид совмещены в один узел и имеют выходной зрачок, расположенный в удобном для наблюдателя месте [1].

ДСФ-40 работает в режиме параллельного съема данных по всем 40 каналам, и это качество дает ему преимущества перед системами регистрации с последовательным считыванием элементов изображения, так как при параллельном или одновременном считывании практически устраняется влияние на качество данных нестабильного поглощения атмосферы и механических деформаций прибора, а длительность наблюдений сокращается пропорционально числу каналов.

Весьма малый собственный шумовой сигнал диокона дает возможность регистрировать излучение предельно слабых объектов или освещенностей малого контраста. С другой стороны, большой динамический диапазон измерения потоков света, достигающий 10^4 , позволяет исследовать также объекты высокого контраста с большой точностью.

Диокон является цифровым прибором, работающим в режиме счета фотонов, и поэтому представляет интерес сравнить его с фотоумножителями типа ФЭУ-79 или ФЭУ-106, которые применяются в том же режиме. Известно, что квантовая эффективность названных ФЭУ оказывается в 2—3 раза меньше квантового выхода фотокатода, что является следствием потерь фотоэлектронов в фотокатодном объеме и в диодной части. В диоконе этих потерь не существует, поскольку электрическое фокусирующее поле его, достигающее 12—15 кВ, на 4 порядка превышает начальную энергию фотоэлектронов. Некоторые потери фотоэлектронов, по-видимому, происходят из-за отражения от поверхностного слоя кремниевой диодной линейки, которая в диоконе детектирует их. По данным [2], от поверхности кремния может отражаться до 17 % падающих на него электронов.

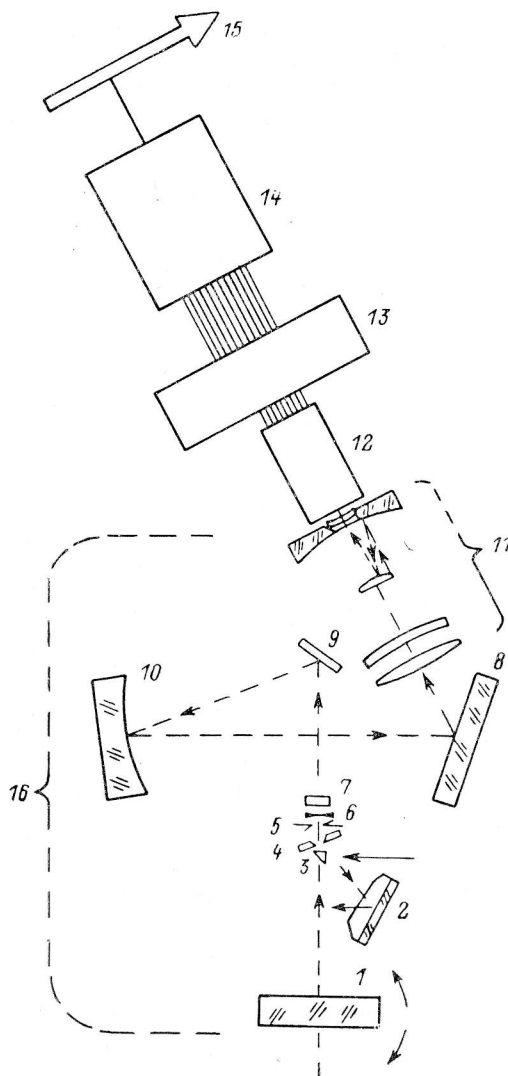
Темновой ток диокона в расчете на 1 канал при одинаковых по светочувствительности фотокатодах, на 2 порядка меньше, чем у ФЭУ. Следовательно, пороговая чувствительность диокона к свету ограничивается только квантовым выходом фотокатода и дробовым шумом потока фотонов. ФЭУ добавляет к дробовому шуму фотонов еще собственный шум и тем самым снижает свою чувствительность.

По сравнению с ФЭУ диокон обладает лучшей фотометрической точностью, благодаря более высокому амплитудному разрешению одноэлектронного пика в амплитудном распределении импульсов (АРИ), регистрируемых на выходе диокона (см. рис. 4). Для диокона амплитудное разрешение составляет 0.25, для ФЭУ — около 1.25. Высокое амплитудное разрешение диокона является следствием монохроматичности энергии электронов, падающих на диодную линейку. В связи с этим диокон представляет собой замечательный образец прибора, достигающего пороговой чувствительности без внесения собственных шумов.

АРИ диокона отличается от АРИ ФЭУ наличием широкого плато (см. рис. 4), которое создает

Рис. 1. Оптическая схема ДСФ-40.

1 — плоскопараллельная пластина, предназначенная для удержания объекта на щели спектрографа. Может быть использована для быстрого перевода ДСФ-40 на другие участки протяженного объекта или на фон неба; 2 — зеркало поисковой и гидрирующей системы; 3 — призмы спектра сравнения; 4 — входная щель спектрографа; 5 — электрический затвор; 6 — светофильтры на револьверном диске; 7 — кварцевый расширитель изображения вдоль щели до 1.8 мм; 8 — сменная дифракционная решетка; 9 — диагональное зеркало; 10 — коллиматор; 11 — оптическая камера 1 : 2 или 1 : 1; 12 — диокон; 13 — 40-канальный усилитель; 14 — блок дискриминаторов и формирователей (БДФ); 15 — линия связи с ЭВМ; 16 — светосильный спектрограф СП-160.



возможность более правильного выбора уровня дискриминации импульсов и, как следствие, лучшую, чем у ФЭУ, фотометрическую стабильность и более полное устранение шумовых сигналов усилительного тракта.

Импульсы, поступающие от диокона, регистрируются в сорока 16-разрядных счетчиках в течение заданной экспозиции и затем могут быть выданы в виде гистограмм со шкалой длин волн на экран дисплея, на графопостроитель или на цифропечать. Первичная обработка данных включает вычит фона свечения ночного неба, суммирование гистограмм, нахождение кривой реакции всей системы и заатмосферной интенсивности по звезде — фотометрическому стандарту. При обработке вводится также коррекция за неравномерность чувствительности делением на сигнал от «плоского поля» и определяются статистические ошибки измерений.

Диокон представляет собой однокамерный электронно-оптический преобразователь, в котором вместо люминесцентного экрана установлена линейка из 40 кремниевых диодов, способных детектировать отдельные электроны, посту-

пающие с фотокатода. На рис. 2 даны внешний вид и сечение диокона. Корпус диокона — металло-керамический. Фотокатод изготавливается в отдельном объеме и через вакуумный шлюз вводится манипулятором по направляющим в диокон, т. е. фотокатод находится на расстоянии 4—5 мм от поверхности защитного стекла. Такой метод изготовления фотокатодов, разработанный и освоенный во ВНИИ ОФИ [3], позволяет практически исключить многоэлектронные импульсы и автоэмиссию с внутренних деталей диокона.

Диодная линейка из 40 дискретных диодов формируется на поверхности кристалла кремния. Каждый диод имеет размеры приемной площадки 0.1×0.3 или 0.35×0.4 мм, где первый размер площадки указывает ширину вдоль

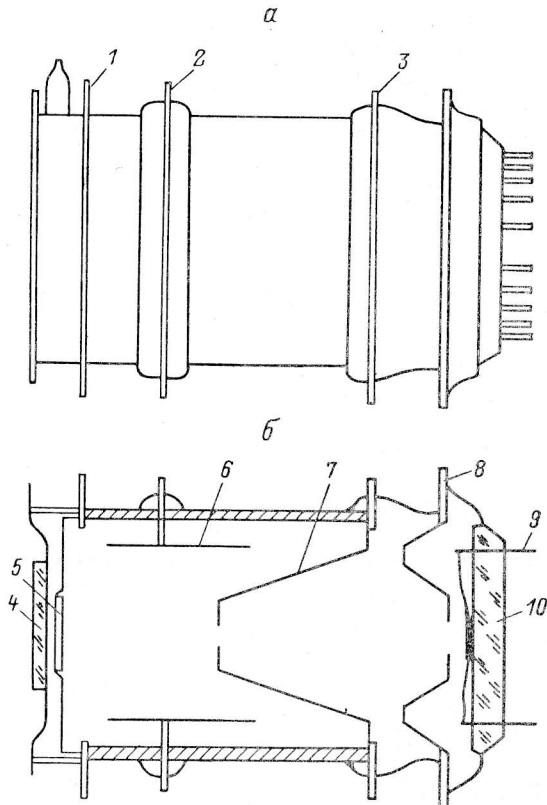


Рис. 2. Внешний вид (а) и сечение (б) диокона.

1 — вывод фотокатода; 2 — вывод подфокусирующего электрода; 3 — анодный вывод; 4 — защитное стекло; 5 — фотокатод; 6 — подфокусирующий электрод; 7 — анод; 8 — экран; 9 — штырьки на каждый диод; 10 — диодная линейка.

линейки. По обе стороны линейки размещены контактные площадки диодов, от которых идут проводники к штырькам 9 диокона (рис. 2). С наружной стороны к штырькам присоединяются усилители.

Каждый электрон, образующийся на фотокатоде 5 под действием света, ускоряется в электрическом поле диокона до энергии 15 кэВ и, попадая на диод, генерирует в нем до $3 \cdot 10^3$ пар «электрон—дырка», которые разделяются в «—» переходе диода и регистрируются усилителем.

Результаты исследования диодных линейек и диоконных изложены в [3—8]. Характеристики диоконных, изготовленных во ВНИИОФИ [3], следующие:

Диапазон спектральной чувствительности, нм	330—850
Максимум спектральной чувствительности, нм	450
Квантовая эффективность фотокатода в максимуме спектральной чувствительности, %	18—20
Неравномерность чувствительности фотокатода по рабочему полю, %	менее 10
Темновой фон термоэлектронов при 18 °С, эл/(с.см ²)	(1—3) · 10 ³
Разрешающая способность электростатической фокусировки в центре поля, п. л./мм	33

Ускоряющее напряжение (отрицательный потенциал на фотокатоде), кВ	до 15
Число электронно-чувствительных элементов	40
Размер элемента вдоль линейки, мм	0.1 или 0.35
Поперек линейки, мм	0.3 или 0.4
Зазор между соседними элементами, мм	0.01 или 0.025
Суммарная выходная емкость канала регистрации, пФ	7—15
Разрешающее время канала диодона, мкс	5
Напряжение смещения на диодах линейки, В	не более 4
Электронное увеличение	1 ± 0.1
Фокусировка изображения	электростатическая
Масса диодона, кг	0.5

Высокое напряжение подается на диокон от источника питания по кабелю РК-50-4. Поскольку на диоконе имеется подфокусирующий электрод, потенциал которого отличается от напряжения на катоде на несколько сотен вольт,

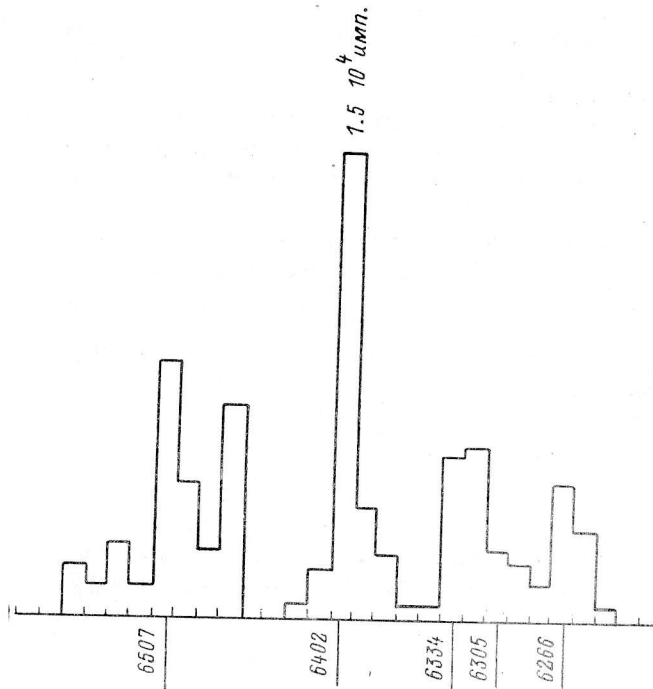


Рис. 3. Гистограмма спектра излучения ЛПК с неоновым наполнением. Дисперсия спектрографа 104 \AA/mm , расстояние между центрами диодов по спектру 13.8 \AA .

то на корпусе диодона монтируется делитель напряжения из резисторов КЭВ-05. Корпус диодона и делитель защищены от внешней среды слоем компаунда типа «виксинт» толщиной 4—5 мм.

Диокон как счетчик фотонов характеризуется определенным динамическим диапазоном, т. е. интервалом допустимых значений скоростей счета импульсов, возникающих под действием фотонов, в котором достигается необходимая фотометрическая точность. Нижняя граница интервала, когда поток света очень мал, ограничена дисперсией потока шумовых импульсов. В диоконе источником шумовых импульсов являются: термоэлектронная эмиссия фотокатода и усилители. Как показали наши измерения, исправный диокон характеризуется термоэмиссией около 0.1 эл/с. диод . При этом понижение температуры до 0°C уменьшает термоэмиссию на порядок. Что касается шума усилителя, главным образом той его части, которая называется предусилителем и размещается на диоконе, то система регистрации позволяет этот шум дискриминировать. Верхняя граница интервала ограничена временным разрешением усилителя, т. е. тем минимальным отрезком времени между следующими друг за другом импульсами, когда импульсы регистрируются как отдельные.

Спектр сравнения и шкала длин волн. Для отождествления спектра излучения, зарегистрированного диоконом, служит лампа с полым железным катодом (ЛПК), заполненная инертными газами (неоном, аргоном и ксеоном) до давления не более 10 мм рт. ст. ЛПК дает достаточный и равномерный по яркости набор линий излучения. Благодаря источнику питания лампы, имеющему стабилизацию выходного тока, интенсивность спектральных линий стабильна.

Построение шкалы длин волн на гистограмме исследуемого спектра производится по алгоритму, приведенному ниже, и основывается на выставлении известной линии сравнения (реперной линии) на то место диодной линейки, которое требуется наблюдателю. Реперная линия должна быть одиночной, т. е. при данном спектральном разрешении она не блендируется соседними линиями. Любое блендирование уменьшает точность выставления реперной линии. На рис. 3 дан пример спектра сравнения с одиночной и удобной для отождествления реперной линией λ 6402.

Методика выставления шкалы длин волн должна гарантировать необходимую точность и основываться на доступных исходных данных, чтобы быть оперативной и удобной.

Предлагаемая методика исходит из следующих исходных данных.

1. Угол ψ — угол падения на дифракционную решетку спектрографа коллимированного пучка света. Угол отсчитывается по шкале, имеющейся на спектрографе, с точностью ± 3 угл. мин.

2. Отождествленная реперная линия λ_p .

3. Координата x_p , соответствующая требуемому положению λ_p на диодной линейке.

4. Данные о камере спектрографа и о применяемой дифракционной решетке: фокусное расстояние камеры f , число C штрихов на 1 мм решетки, рабочий порядок интерференции решетки m :

5. Сведения о диоконе: масштаб передачи изображения от фотокатода на диодную линейку q ; ширина приемной площадки диода b , промежуток между диодами Δb .

Данные по пунктам 3, 4, 5 известны заранее наблюдателю.

Если обозначить через λ_k длину волны, соответствующую центру диода, имеющего на линейке порядковый номер n_k ($1 \leq n_k \leq 40$), который отсчитывается от «синего» конца спектра на линейке, то по уравнению дифракционной решетки найдем

$$\lambda_k = \frac{\sin \psi + \sin \varphi_k}{mC}, \quad (1)$$

где φ_k — угол дифракции монохроматического пучка света с длиной волны λ_k . Если φ_p соответствует углу дифракции λ_p , то имеем

$$\varphi_k = \varphi_p + \frac{x_k - x_p}{qf}, \quad (2)$$

где x_k — координата центра k -го диода в линейных единицах. Так как ширина диода b и ширина промежутка Δb известны, то

$$x_k = b(n_k - 0.5) + \Delta b(n_k - 1). \quad (3)$$

Аналогично определяется координата x_p для реперной линии λ_p . Если реперную линию наводить на центр промежутка Δb , то точность выставления шкалы длин волн возрастет в 10 раз, так как промежуток в 10 раз меньше ширины диода. Пусть координата такого центра промежутка равна

$$x_p = bn_p + \Delta b(n_p - 0.5), \quad (4)$$

где λ_p наведена на промежуток между диодами n_p и $n_p + 1$. По (3) и (4) находим:

$$x_k - x_p = (b + \Delta b)(n_k - n_p - 0.5). \quad (5)$$

Из уравнения (1) следует

$$\varphi_p = \arcsin (mC\lambda_p - \sin \psi). \quad (6)$$

Подставляя (5) в (2), имеем

$$\varphi_k = \varphi_p + \frac{(b + \Delta b)(n_k - n_p - 0.5)}{gf}. \quad (7)$$

На основании (1), (5), (6), (7) получаем

$$\lambda_k = \frac{\sin \psi + \sin [\arcsin (mC\lambda_p - \sin \psi) + (b + \Delta b)(n_k - n_p - 0.5)/gf]}{mC \cdot 10^{-7}}. \quad (8)$$

Если углы выражать в градусах [в том числе слагаемые в квадратных скобках уравнения (9)], а длины волн — в ангстремах, C — в штр/мм, b , Δb и f — в миллиметрах, то получим окончательный алгоритм:

$$\lambda_k = \frac{\sin \psi + \sin [\arcsin (mC\lambda_p \cdot 10^{-7} - \sin \psi) + 57.3 (b + \Delta b)(n_k - n_p - 0.5)(gf \cdot 10^3)]}{mC \cdot 10^{-7}}. \quad (9)$$

При этом следует учитывать, что в СП-160 угол $\psi < 0$, а в УАГС $\psi > 0$.

Поскольку реальная точность отсчета угла ψ составляет ± 3 угл. мин, то были проведены расчеты ожидаемой ошибки в шкале длин волн, определяемой по (9). Были рассмотрены случаи положения λ_p в центре линейки и на ее краях для конкретных значений m , C , f , b , Δb , λ_p . Получено, что для линейки $b=0.1$ и $\Delta b=0.01$ ошибка выставления оказалась равной 0.5 \AA при спектральной ширине диода 23 \AA и почти не зависит от номера диода.

Подготовка к наблюдениям. Получение, обработка данных.

Фокусировка диокона на спектрографе. Подготовка ДСФ-40 к наблюдениям после его установки на телескоп начинается с фокусировки диокона на фокальную плоскость камеры спектрографа и выставления порогов дискриминации. Обе операции взаимозависимы, т. е. влияют друг на друга, и поэтому проводятся поочередно методом последовательного приближения. Допустим, что пороги дискриминации уже выставлены, но приблизительно, поэтому необходимо начать с фокусировки. Хотя размер приемных площадок диодов заметно больше привычного нам линейного разрешения фотоматериалов или ПЗС-матриц, измерения разрешающей способности диокона показали [6], что каждый диод дает большую крутизну крыльев кривой, характеризующей диапазон пространственных частот, которые регистрируются прибором. Отсюда следует, что при фокусировке по линиям спектра сравнения, чтобы не исказить аппаратную функцию спектрографа, необходимо особо тщательное выставление диокона, чтобы реперная линия попала не просто на диод, а в его центральную часть.

На рис. 3 дана гистограмма спектра сравнения, на которой заметно выделяется яркая линия неона $\lambda 6402 \text{ \AA}$. Ближайшая к ней линия $\lambda 6383 \text{ \AA}$ при обратной линейной дисперсии 104 \AA/мм и ширине диода 0.1 мм попадает на соседний диод. Следовательно, линию $\lambda 6402 \text{ \AA}$ можно считать одиночной и использовать для фокусировки диокона, которая ведется в следующем порядке. Одиночная реперная линия, например $\lambda 6402 \text{ \AA}$, поворотом решетки выставляется на центр линейки с помощью интенсиметра, имеющегося в комплекте системы регистрации. Задача выставления реперной линии существенно упрощается, если сигналы с диодов выводятся на дисплей в виде гистограммы в непрерывном режиме смены кадров. Используя тонкие подвижки узла крепления диокона к спектрографу (поперек дисперсии спектрографа, вокруг оси и вдоль оси оптической камеры), добиваются максимального отсчета от реперной линии на центральном диоде. Далее реперная линия переводится последовательно на крайние диоды, где продельваются те же операции фокусировки, затем снова на центральный диод и т. д. В связи с этой методикой необходимо и удобно, чтобы ЛПК давала стабильные по интенсивности спектральные линии, что достигается стабилизацией источника питания ЛПК.

При фокусировке необходимо устанавливать размер изображения спектральной линии по ширине и по высоте диода не более, чем его размеры. Если яркость линии достаточна, то предпочтительно ширину изображения линии уменьшить раза в два по сравнению с шириной диода.

Выставление порогов дискриминации. Дискриминаторы требуются для отделения импульсов, образующихся под действием электронов, ускоренных в электрическом поле диодона, от импульсов, возникающих в тракте усиления, амплитуда которых меньше амплитуды импульсов от ускоренных электронов. АРИ, возникающих в канале усиления, показано на рис. 4. От точки a левая ветвь кривой дает распределение шумовых импульсов тракта усиления. Расчеты показали, что порог дискриминации по амплитуде следует устанавливать у отметки a .

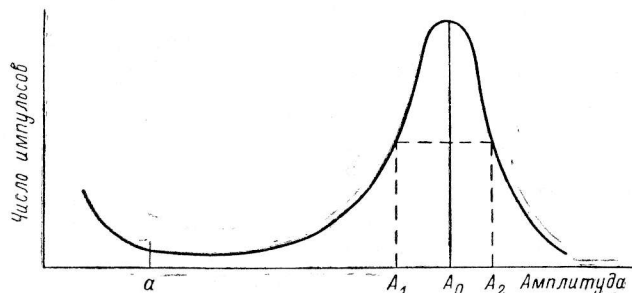


Рис. 4. Амплитудное распределение импульсов (АРИ).

a — оптимальный уровень дискриминации. Амплитудное разрешение $(A_2 - A_1)/A_0$.

Наиболее надежный способ выставления порогов базируется на измерении для каждого канала АРИ, показанного на рис. 4. Контролируя по экрану дисплея характер АРИ при регулировке порога, можно уверенно и быстро выставить все пороги.

Второй способ, весьма длительный, заключается в измерении отношения сигнала к шуму (ОСШ) при разных порогах дискриминации. Для этого надо получить зависимости темнового счета импульсов (при закрытом от света фотокатоде) и числа импульсов за то же время при освещении фотокатода от порога дискриминации и по формуле (10) найти, при каком пороге ОСШ окажется наибольшим:

$$\text{ОСШ} = (N_{\text{С+ш}} - N_{\text{ш}}) / \sqrt{N_{\text{С+ш}} + N_{\text{ш}}}, \quad (10)$$

где $N_{\text{ш}}$ — число импульсов от темнового фона; $N_{\text{С+ш}}$ — число импульсов при засветке диодона, включая импульсы от темнового фона. В качестве источника света лучше всего подходит эталон яркости, возбуждаемый изотопом С^{14} .

Третий способ основан на измерении скорости счета в каждом канале в следующем порядке: при отключенном ускоряющем напряжении порог выставляется так, чтобы скорость счета была равна нулю; на диокон подается напряжение и контролируется, насколько возрастает счет импульсов. Если в пределах термоэмиссии — то можно давать подсветку фотокатода и менять порог, отыскивая точку a , которая характерна тем, что влево от нее счет растет быстрее, чем вправо.

При наличии стабильного источника подсветки можно быстро ориентироваться в выставлении порога, опираясь на предыдущий опыт, полученный на том же диоконе. Воспроизводимость светового потока от эталона яркости зависит не только от постоянства температуры, но и от того, насколько одинаково устанавливается ширина входной щели спектрографа. Это требование с высокой точностью соблюдается в СП-160, в УАГС ширина щели может быть воспроизведена с точностью ± 5 мкм.

Обработка наблюдательных данных. При наблюдениях на ДСФ-40 необходимо получать данные о спектральном излучении исследуемого объекта, звезды — фотометрического стандарта, ночного неба и собственного фона аппаратуры.

Чтобы анализировать качество данных, принято накопление данных вести по частям, т. е. делить общую экспозицию на серию более коротких, непрерывно следующих друг за другом выдержек. Если в течение выдержки t_{ik} (где i — порядковый номер выдержки, k — порядковый номер канала или диода) накапливается N_{ik} импульсов, то за m выдержек в каждом k -м канале получим N_k импульсов:

$$N_k = \sum_1^m N_{ik}. \quad (11)$$

Обозначая объект наблюдения индексом «об», фотометрический стандарт индексом «ст», а фон неба и собственный фон прибора индексом «ф», запишем для k -го канала полученные данные, согласно (11):

$$N_k(\text{об}) = N_k(\text{об} + \text{ф}) - N_k(\text{ф}) T_k(\text{об} + \text{ф})/T_k(\text{ф}); \quad (12)$$

Соответственно для экспозиций:

$$N_k(\text{ст}) = N_k(\text{ст} + \text{ф}) - N_k(\text{ф}) T_k(\text{ст} + \text{ф})/T_k(\text{ф}). \quad (13)$$

При этом число выдержек m и суммарное время экспозиции могут быть разными для объекта, стандарта и фона по разным причинам, а также и потому, что часть выдержек может выпасть при первичном анализе из-за плохого качества (влияние атмосферы, помехи аппаратуры и другие ошибки). Поэтому вычитание фона производится после приведения его к тому же времени накопления, что и у объекта.

Находим относительные ошибки измерений для $N_k(\text{об})$ и $N_k(\text{ст})$:

$$\delta_k(\text{об}) = \sqrt{N_k(\text{об} + \text{ф}) + N_k(\text{ф}) \frac{T_k(\text{об} + \text{ф})}{T_k(\text{ф})}} / N_k(\text{об}); \quad (14)$$

$$\delta_k(\text{ст}) = \sqrt{N_k(\text{ст} + \text{ф}) + N_k(\text{ф}) \frac{T_k(\text{ст} + \text{ф})}{T_k(\text{ф})}} / N_k(\text{ст}). \quad (15)$$

С целью дальнейшей обработки значения $N_k(\text{об})$ и $N_k(\text{ст})$ преобразуем в интенсивности

$$I_k(\text{об}) = N_k(\text{об})/T_k(\text{об} + \text{ф}); \quad I_k(\text{ст}) = N_k(\text{ст})/T_k(\text{ст} + \text{ф}), \quad (16)$$

для которых ошибки остались теми же (14) и (15).

Если известна заатмосферная монохроматическая освещенность звезды-стандарта, то можно получить кривую реакции всей системы регистрации, включая телескоп и атмосферу, по формуле

$$R_k = I_k(\text{ст})/I_k^*(\text{ст}), \quad (17)$$

где $I_k^*(\text{ст})$ — заатмосферная интенсивность в относительных единицах, приведенная к спектральным интервалам, соответствующим каждому диоду.

По кривой реакции вычисляется относительная заатмосферная интенсивность исследуемого объекта

$$I_k^*(\text{об}) = I_k(\text{об})/R_k. \quad (18)$$

Соответственно относительная ошибка для $I_k^*(\text{об})$ будет

$$\delta_k^*(\text{об}) = \delta_k(\text{об}) + \delta_k(\text{ст}) + \delta_k^*(\text{ст}),$$

где $\delta_k^*(\text{ст})$ — относительная ошибка измерения монохроматической интенсивности звезды-стандарта за атмосферой, которая дается в спектрофотометрических (ст) каталогах звезд.

Устранение влияния на результат неоднородности чувствительности диодов по каналам. Качественные фотоэлектронные приборы и твердотельные фотодетекторы обычно характеризуются неоднородностью чувствительности к детектируемым фотонам или электронам, лежащей в пределах 10 %. Благодаря стабильности указан-

ной неоднородности в каждом канале она легко может быть устранена путем сравнения с сигналом, получаемым при освещении диодного источником, создающим стабильную и одинаковую освещенность на рабочем поле светоприемника. В обиходе эту операцию принято называть «делением на плоское поле».

В ДСФ-40 в качестве источника света применяется эталон (люминофор, возбуждаемый изотопом C^{14}). Эталон устанавливается в спектрографе между дифракционной решеткой и оптической камерой, при необходимости он легко выводится из поля камеры.

Поскольку деление на плоское поле, устраняя неоднородность, увеличивает статистическую ошибку измерения в каждом канале, необходимо накапливать сигнал от плоского поля до значений, относительная ошибка которых будет на порядок меньше, чем от исследуемого объекта.

К примеру, чтобы достичь фотометрической точности 1 % при наблюдении объекта, необходимо зарегистрировать плоское поле с ошибкой не более 0.1 %, т. е. накопить в каждом канале не менее 10^6 импульсов. Если фотодетектор или система регистрации делают существенный вклад в шумовой сигнал, то эта цифра может возрасти на порядок.

Результаты наблюдений на телескопах.

Квантовая эффективность диодного. Эта величина определяется квантовым выходом фотокатода и эффективностью регистрации фотоэлектронов диодной линейкой. При этом считается, что каждый электрон, отдавший свою кинетическую энергию на образование в кремнии заряда, будет зарегистрирован в виде импульса. Квантовый выход фотокатода измеряется лабораторными средствами и известен заранее, т. е. до начала астрономических наблюдений. Эффективность детектирования электронов диодами на кристалле кремния, по [4], составляет около 90 %, а по данным [2], — 83 %.

Представляло интерес измерить эту эффективность на реальных объектах, т. е. по звездам, для которых известна спектральная энергетическая освещенность. Были проведены наблюдения на ДСФ-40 звезды HD 116581, $V=6.07$ зв. вел., на телескопе фирмы Цейсс (диаметр зеркала 60 см) и на спектрографе УАГС. Данные для заатмосферной энергетической освещенности для этой звезды взяты из [9]. С помощью ДСФ-40 была зарегистрирована интенсивность излучения звезды в области $\lambda 5465 \text{ \AA}$, в которой энергетическая освещенность равна

$$E = 9.8 \cdot 10^{-4} \text{ эрг/(с} \cdot \text{см} \cdot \text{см}^2) = 2.7 \text{ фотона/(с} \cdot \text{\AA} \cdot \text{см}^2).$$

Во время наблюдений в ночь 20—21 марта 1986 г. прозрачность атмосферы не вызвала сомнений, а звезда была близка к зениту, поэтому коэффициент пропускания атмосферы был принят равным $P=0.75$. Пропускание телескопа в касегрене (два зеркала и центральное виньетирование пучка гиперболическим зеркалом) приняли 66 %. Пропускание спектрографа УАГС с объективом $f 150 \text{ мм}$ (1 : 2) — не более 11—12 %.

Поток света, собираемый телескопом, $D=600 \text{ м}$,

$$\Phi = \tau P E \frac{\pi D^2}{4} = 1.4 \cdot 10^3 E \text{ фотон/(с} \cdot \text{\AA}).$$

Дисперсия УАГС была 103.5 \AA/мм . Для диодного $b=0.1 \text{ мм}$ и $q=0.83$, спектральная ширина диода 12.47 \AA . Отсюда поток электронов, падающий на диод за время t , будет

$$N = \gamma \Phi \Delta \lambda t \text{ эл.},$$

где $\gamma=8.3 \%$ — квантовый выход фотокатода в области $\lambda 5465 \text{ \AA}$, $\Delta \lambda=12.47 \text{ \AA}$, $t=30 \text{ с}$.

Подставляя в последнее выражение известные значения, найдем число импульсов N , которое данный диод зарегистрировал бы при 100%-ной эффективности регистрации попавших на диод электронов. Находим $N=11737$ имп. Во время наблюдений HD 116581 было зарегистрировано за 30 с 10553 импульса. В результате счетная эффективность диода равна 90 %. С учетом

квантового выхода фотокатода квантовая эффективность диокона составит 7.5 % в этой области.

Измерение свечения ночного неба представляло методический интерес и в то же время показало, что на Нижней научной площадке обсерватории при наблюдениях на телескопе Цейсс-600 мм скрыши лабораторного корпуса свечение неба довольно велико и составляет 5 имп/с на 1 канал. Возможно, увеличение фона произошло из-за снежного покрова и светивших около лабораторного корпуса фонарей.

На рис. 5 даны пять гистограмм спектра ночного неба, полученных при временах накопления 10, 25, 50, 200 и 1200 с. По оси ординат отложено число импульсов в каждом из 22 задействованных каналов. Три первые гистограммы даны в масштабе 1 : 1, 4-я — 1 : 14, 5-я — 1 : 60. Кроме того, 4-я и 5-я гистограммы сдвинуты в красную область дифрешеткой, чтобы вывести на ли-

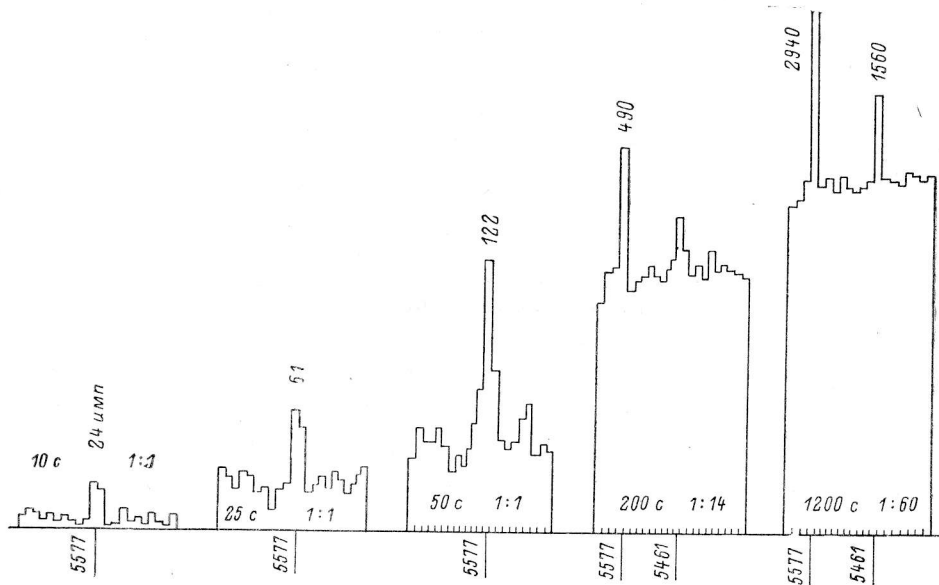


Рис. 5. Гистограмма фона ночного неба, полученная на УАГС, установленном на телескопе Цейсс-600.

Фон неба в континууме регистрировался со скоростью 5 имп/с, линия λ 5577 — со скоростью 2.5 имп/с, линия λ 5461 — со скоростью 1.3 имп/с. Экспозиции и масштаб указаны на рисунке.

нейку линию ртути λ 5461. Числа на линиях λ 5577 и 5461 указывают количество импульсов в линии за вычетом континуума. Отчетливо видно, как повышается качество спектра (или отношение сигнал/шум) по мере накопления. Если на 1-й гистограмме для линии λ 5577 ОСШ=3.8, то на 2-й — 5.9, на 3-й — 8. На 4-й и 5-й гистограммах флуктуации континуума существенно уменьшаются и обнаруживается еще более слабая линия λ 5461, принадлежащая к ртути. Причем для λ 5577 ОСШ возрастает от 10 до 24. Из приведенных значений ОСШ нетрудно вычислить, что оно растет пропорционально \sqrt{t} , где t — время накопления. Этот результат дает также право утверждать, что при накоплении собственный фон диокона является несущественным. На рис. 6 даны две гистограммы ночного неба, наложенные друг на друга, чтобы дать представление о воспроизводимости регистрограмм.

Для иллюстрации возможностей диокона в спектрофотометрии на рис. 7 дана гистограмма спектра звезды ϵ UMa того спектрального интервала, в котором находится сильная абсорбционная линия H_γ λ 4340.5 Å. На рис. 7, а гистограмма дана в том виде, в каком она была получена на ДСФ-40 на Цейсс-600 мм. На рис. 7б дан участок гистограммы с H_γ в увеличенном масштабе. Штрихами нанесен профиль этой же линии из спектра, полученного на Основном звездном спектрографе БГА с дисперсией 9 Å/мм. Для сравнения были

измерены эквивалентные ширины линии $H\gamma$: по гистограмме она равна $W=13 \text{ \AA}$, по спектру ОЗСП $W=15.6 \text{ \AA}$.

Стабильность счетной характеристики. По своим характеристикам все действующие диоды диокона идентичны, и их сходство является следствием высокоточной технологии формирования $p-n$ -переходов и геометрических размеров приемных площадок, а также качества кристалла кремния. По измерениям однородность чувствительности диодов лежит в пределах не менее 90%. Поскольку каждый канал кроме диода включает усилитель и дискриминатор, то очевидно, что их влиянием на устойчивость счетной характеристики пренебрегать нельзя. К источникам возможной нестабильности

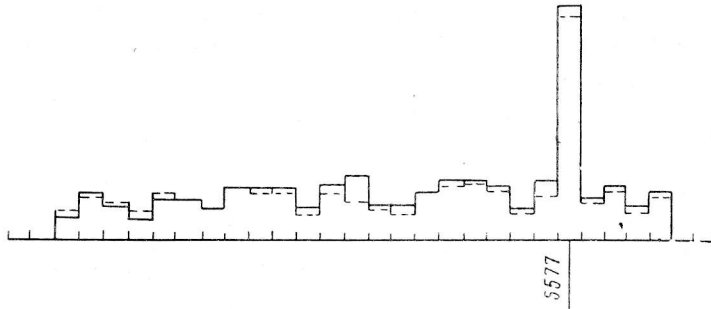


Рис. 6. Две гистограммы спектра излучения фона неба, наложенные друг на друга для сравнения воспроизводимости прибора.

Экспозиции по 100 с.

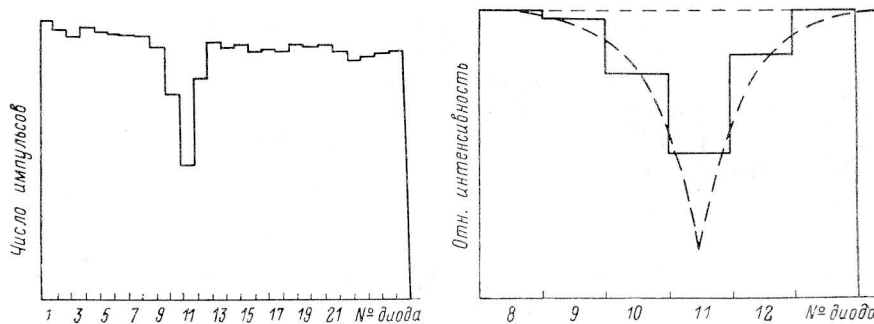


Рис. 7. Гистограмма участка спектра звезды ϵ UMa, полученная на телескопе Цейс-600 и спектрографе УАГС с дисперсией $103 \text{ \AA}/\text{мм}$.

a — гистограмма до обработки. Видна линия $H\gamma$ 4340.5 \AA ; *b* — гистограмма после нормировки на континуум и увеличения масштаба. Штрихами нанесена та же линия, полученная на БТА на спектрографе ОЗСП с дисперсией $9 \text{ \AA}/\text{мм}$.

можно отнести: 1) возникновение внутри вакуумной колбы диокона микровспышек [10], длительность которых очень мала, но они могут приводить к завышению сигнала в ряде каналов. Микровспышки появляются во всех фотоэлектронных приборах, работающих при высоких напряжениях. Частота их появления зависит от качества прибора; 2) импульсные наводки или помехи, воздействующие на систему регистрации. Одна из причин — неправильное заземление или экранирование.

Оба названных источника помех носят случайный характер и могут быть устранены путем выбраковки из серии отсчетов тех значений, которые существенно (по критерию допустимых выбросов) отличаются от большинства значений величины.

Остановимся на стабильности счета каналов в зависимости от времени. Если эта стабильность сохраняется в пределах среднеквадратичной ошибки одного отсчета, то можно считать, что система стабильна.

Что касается неоднородности чувствительности диодов, то если они стабильны во времени, то неоднородность их устраняется известным способом

«плоского поля», т. е. делением на гистограмму, полученную при равномерной засветке.

Для измерения стабильности во времени отсчеты снимались с нескольких диодов. Так как они оказались равноценными, то здесь приводятся результаты только по одному каналу регистрации.

В качестве источника света использовались: эталон яркости, возбуждаемый изотопом C^{14} , накаливая миниатюрная лампочка с питанием от стабилизированного источника. Температура во время измерений 19-21 °С.

ТАБЛИЦА 2
Средняя скорость счета 537 имп/с

Номер замера	Средняя скорость \bar{n} в замере из 40 отсчетов, имп/с	Среднеквадратичная ошибка σ , имп/с	Относительная ошибка, %
1	541	24	4.4
2	532	21	3.9
3	537	22	4.1
4	547	23	4.2
5	534	21	3.9
6	529	19	3.6
7	538	17	3.2
8	539	19	3.5

ТАБЛИЦА 3
Средняя скорость счета 2095 имп/с

Номер замера	Средняя скорость \bar{n} в замере из 50 отсчетов, имп/с	Среднеквадратичная ошибка σ , имп/с	Относительная ошибка, %
1	2122	44	2
2	2127	44	2
3	2090	43	2
4	2100	44	2
5	2075	34	1.6
6	2078	43	2.2
7	2099	42	2.5
8	2075	34	1.9
9	2086	46	2.1
10	2095	52	2.2
11	2088	39	2.4
12	2129	43	2.1
13	2114	46	2.4
14	2093	50	2.2
15	2098	46	2.0
16	2074	49	2.4
17	2067	38	1.8

Было установлено, что система регистрации выходит в этих условиях на нормальный режим работы через 5 мин после ее включения.

Исследование стабильности производилось при трех скоростях: 537, 2095, 10172 имп/с.

При средней скорости счета 537 имп/с измерения длились 12 ч, в течение которых было сделано 8 замеров (табл. 2), в каждом замере по 40 отсчетов. В течение 12 ч система регистрации дважды отключалась от сети, но на результатах это не сказалось. Среднеквадратичная ошибка в каждом замере определялась по 40 отсчетам по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2 / (N - 1)}, \quad (19)$$

где $N=40$. Отсюда средняя ошибка среднеарифметического для каждого замера

$$\sigma_{\bar{n}} = \sigma/\sqrt{N}. \quad (20)$$

Сравнивая полученные 8 значений средних скоростей \bar{n} , видим, что они с большой надежностью укладываются в доверительный интервал $\pm\sigma_{\bar{n}} \approx 3.4$. Следовательно, можно считать, что в рассмотренном эксперименте система регистрации дает высокую стабильность.

При средней скорости счета 2095 имп/с продолжительность измерений была 27 ч (табл. 3). После 11-го замера аппаратура выключалась на 16 ч. В среднем

ТАБЛИЦА 4
Средняя скорость счета 10172 имп/с

Номер замера	Средняя скорость \bar{n} в замере по 50 отсчетов, имп/с	Среднеквадратичная ошибка σ , имп/с	Относительная ошибка, %
1	10187	89	0.88
2	10169	87	0.86
3	10196	87	0.85
4	10195	88	0.86
5	10095	87	0.86
6	10065	86	0.86
7	9852	163	1.7
8	10480	162	1.5
9	10487	169	1.6
10	10281	99	1.0
11	10228	102	1.0
12	10222	79	0.8
13	10180	97	0.9
14	10169	97	1.0
15	10140	111	1.1
16	10164	106	1.0

число отсчетов в замере $N=50$, но имели место отсчеты, которые отбрасывались, так как превышали среднее значение \bar{n} в замере на 3σ , из-за чего число отсчетов уменьшалось и соответственно возрастала σ . По (19), (20) находим σ и $\pm\sigma_{\bar{n}} \approx 6.3$.

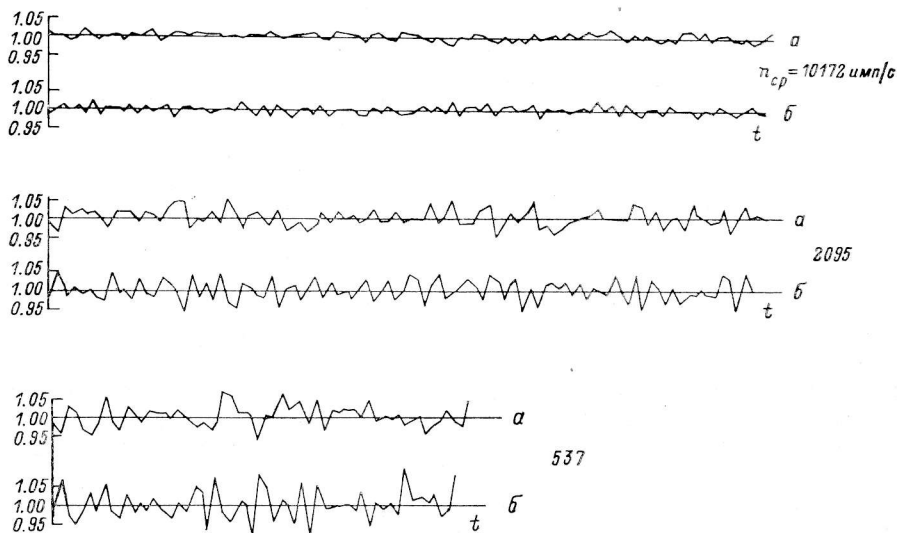


Рис. 8. Зависимость числа отсчетов диокона от времени при регистрации света разной интенсивности.

Дисперсия отсчетов имеет случайный характер; a — отношение единичного отсчета к среднему по всем отсчетам; b — отношение последующего отсчета к предыдущему.

Здесь разброс значений \bar{n} больше, чем в табл. 2, хотя значения \bar{n} лежат в диапазоне σ , но не все значения σ укладываются в доверительный интервал $\pm\sigma_{\bar{n}}$.

При скорости 10172 имп/с в течение 28 ч было сделано 16 замеров по 50 отсчетов в каждом замере (табл. 4). При анализе результатов 3 замера отброшены (замеры 7—9), так как значения \bar{n} отличаются более чем на 3σ от среднего по всем замерам. Одной из причин возникновения выбросов, как уже говорилось, могут быть микровспышки или просчеты из-за помех. После отбрасывания замеров 7—9 получаем среднее из 13 оставшихся 10172 имп/с. Доверительный интервал $\pm\sigma_n \approx 13$. Большинство полученных замеров лежит в этом интервале, что указывает на хорошую стабильность системы.

На рис. 8 даны зависимости скоростей счета в одном канале от времени, т. е. графическое представление о стабильности при трех среднестатистических скоростях счета — 537, 2095 и 10172 имп/с. По оси ординат даны скорости счета в относительных единицах: помеченные индексом a — относительно средней скорости счета, индексом b — каждый последующий отсчет делится на предыдущий. Если бы значения отсчетов были постоянными, то все точки лежали бы на прямой с ординатой, равной 1.

Сравнение кривых a и b дает возможность выявить систематическую ошибку, т. е. отклонение от случайного характера разброса данных. Можно также убедиться, что выбросы отдельных отсчетов от оси абсцисс в своем большинстве лежат в пределах $\pm\sigma/\bar{n}$.

Литература

1. Копылов И. М., Рылов В. С. Спектральная аппаратура 6-м телескопа // Новая техника в астрономии. Л.: Наука, 1979. Вып. 6. С. 24—30.
2. Вятский А. Я., Кабанов А. Н., Смирнов А. Н., Храмов В. Ю. Исследование закономерности взаимодействия электронов 5—30 кэВ с массивными твердыми телами // Радиотехника и электроника. 1977. 22, № 7. С. 1439—1444.
3. Многоканальный цифровой ЭОП / В. Ф. Гершанский, В. Г. Дебур, Г. А. Кузьмин и др. // Тр. 3-й Всесоюз. конфер. «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение». М.: ВНИИОФИ, 1979. С. 8.
4. Бивер Е., Мак Илуэйн К. Цифровой многоканальный фотометр // Приборы для науч. исслед. 1971. 42, № 9. С. 38—41.
5. Дебур В. Г., Максименко Б. П., Рылов В. С. Счетные характеристики кремниевых диодов для детектирования электронов // Сообщ. САО. 1979. 25. С. 45—54.
6. Алексеев В. Д., Дебур В. Г., Забродская В. П., Рылов В. С. Диодные линейки для детектирования фотоэлектронов // ПТЭ. 1982. № 1. С. 172—175.
7. Цифровой ЭОП / В. Г. Дебур, Р. И. Кулакова, А. М. Мечетин и др. // Электронная техника. 1984. Сер. 4, вып. 2. С. 16—17.
8. Фотоэлектронный преобразователь / В. Г. Дебур, В. М. Коган, А. М. Мечетин и др. // ПТЭ. 1986. Вып. 3. С. 171—173.
9. Харитонов А. В., Терещенко В. М., Князева Л. Н. Сводный спектрофотометрический каталог звезд. Алма-Ата: Наука, 1978. 198 с.
10. Weaver E. A., Harms R. J., Schmidt G. M. Digicon Application in Astronomy // Advances in El. and El. Physics. 1978. 40B. P. 745—764.

Поступила в редакцию
29 сентября 1988 г.