

## АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ПРИЕМНИКАМ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ ПОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА Т-170М ПРОЕКТА “СПЕКТР-УФ”

© 2008 г. В. Г. Мельников<sup>\*,\*\*</sup>; А. С. Шугаров<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Институт астрономии РАН, Москва

<sup>\*\*</sup> НПО им. С.А. Лавочкина, г. Химки Московской обл.

E-mail: melnikov@laspace.ru, shugarov@inasan.ru

Проведен анализ требований к приемнику излучения оптической камеры поля космического телескопа Т-170М проекта “Спектр-УФ”. Приведен краткий обзор характеристик современных ПЗС-приемников, рассматриваемых в качестве приемников излучения в оптической камере. Даны рекомендации по режимам работы камеры и оценка чувствительности в различных режимах.

Коды OCIS: 040.1240, 040.1520, 040.7190.

*Поступила в редакцию 25.04.2008.*

### Введение

“Спектр-УФ” – это международная внеатмосферная обсерватория для наблюдений в ультрафиолетовой (УФ) и оптической областях спектра. Космический телескоп Т-170М, построенный по схеме Ричи–Кретьена с диаметром главного зеркала 1,7 м, будет оснащен спектрографами высокого и низкого разрешения, блоком камер поля (БКП) для построения высококачественных изображений в УФ и оптическом диапазонах длин волн.

Целью данной статьи является анализ требований и ограничений, накладываемых на параметры детектора оптической камеры поля (ОКП), входящей в состав БКП. Даны рекомендации по выбору конкретных типов современных ПЗС-приемников, оптимальных для использования в ОКП. Проведена оценка чувствительности камеры в различных режимах.

### Научные задачи БКП

Блок камер поля предназначен для исследования астрономических объектов на прямых снимках участков звездного неба в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра (110–700 нм) с помощью набора фильтров. Среди научных задач, которые предполагается решать с использованием данных, получаемых БКП, можно отметить: исследование структурных особенностей областей звездообразования, проблему существования диффузной ионизированной среды, физику аккреционных процессов в астрофизических объектах, физику горячих звезд и звездные вспышки, наблюдение планетных полярных сияний в УФ, наблюдение малых тел в УФ.

В зависимости от решаемой научной задачи от БКП может требоваться высокая фотометрическая

точность, большая проникающая способность, максимальное угловое разрешение, большое поле зрения. Поскольку обсерватория “Спектр-УФ” является многоцелевой, при выборе характеристик приемников излучения (ПИ) ОКП необходимо обеспечить оптимальный баланс параметров, что позволит решать максимально возможный круг научных задач.

### Основные характеристики БКП и их предполагаемая реализация

В настоящее время предполагается реализация БКП в составе трех камер:

- оптической (250–700 нм),
- ближнего ультрафиолета (150–280 нм),
- вакуумного ультрафиолета (115–190 нм).

Оптическая камера будет работать с удлиненным фокусным расстоянием телескопа (соответствует относительному отверстию 1/28). Линейные размеры детектора должны быть порядка 30×30 мм. Средняя по полю полуширина функции рассеяния точки (ФРТ) с учетом стабилизации телескопа ожидается около 20 мкм на длине волны 500 нм.

Требования к выбору размера пиксела ОКП противоречивы. Их необходимо осуществлять исходя из следующих критериев:

К1 – минимальные искажения изображения вследствие его дискретизации. Это соответствует размеру элемента дискретизации, пикселу – не более 0,33 полуширины ФРТ [3], при этом полный размер ФРТ составит 6×6 пикселей ПЗС.

К2 – минимизация погрешности оценки координат центра ФРТ при приемлемых искажениях изображения и предельной чувствительности инструмента. При этом ФРТ должна покрывать зону чувствительной поверхности размером 3×3 пиксела [5, 6].

К3 – максимальная проникающая способность или предельная чувствительность. При этом размер ФРТ не должен превосходить одного пиксела ПЗС.

Оценки показывают, что если учесть ожидаемую погрешность стабилизации телескопа, реализация камер по критерию К1 не дает существенных преимуществ по сравнению с реализацией по критерию К2. Возможность бинирования пикселей, доступная для ПЗС-приемников, обеспечивает реализацию по критерию К3 в рамках критерия К2. Поэтому в качестве основного при выборе параметров ПИ принимаем критерий К2.

*Требования к времени экспонирования и скорости считывания.* Из приведенного списка научных задач следует, что ОКП в первую очередь предназначена для получения так называемых “глубоких” снимков, при съемке которых суммарное время экспонирования может достигать одного часа и более. Для большинства научных задач в настоящее время требования к скорости получения кадров практически отсутствуют и в зависимости от решаемой научной задачи более полно не могут быть сформулированы.

Таким образом, в любом случае при реализации в качестве ПИ ОКП ПЗС-приемников рекомендуется использовать низкую скорость считывания сигналов (порядка 50–200 кГц), при которой обеспечивается минимальный шум считывания.

*Разбитие экспозиции на серию субэкспозиций.* Максимальное время одиночной экспозиции ОКП при работе на орбите ограничивается временем, за которое достигается допустимая плотность следов на снимке, образующихся при воздействии космических частиц на ПИ. Для WFPC2 (Wide Field and Planetary Camera 2) телескопа им. Хаббла плотность потока частиц, оставляющих видимый след на снимках, полученных на ПЗС, составляет  $1,8 \text{ шт } \text{с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ . При попадании в ПИ одной частицы в среднем наблюдаются сигналы в 6 соседних пикселах. Известные алгоритмы очистки изображений от следов космических частиц эффективно работают, если суммарная площадь следов составляет 1–5% от всей площади ПЗС-приемника, что ограничивает время одиночной экспозиции 10 минутами.

В настоящее время ввиду отсутствия окончательной ясности в конструкции ОКП и во всех ее параметрах невозможно провести количественный расчет потока частиц. По всей видимости, максимальное время одиночного экспонирования будет примерно таким же, как и в WFPC2 телескопа им. Хаббла, т. е. порядка 10 мин. Получение кадра с большей экспозицией возможно путем суммирования сигналов нескольких кадров, полученных друг за другом.

*Темновой ток.* Темновой ток ПИ не должен вносить существенную составляющую в общий шум при максимальном времени экспозиции 1 час.

*Динамический диапазон.* Динамический диапазон детектора ОКП по возможности должен быть как можно большим, однако данный параметр не является приоритетным. Достижение динамического диапазона более 10000:1 можно считать успешным.

*Линейность.* Линейность приемников БКП является критическим параметром, поскольку значительная часть снимков будет требовать последующей точной фотометрической научной обработки.

*Квантовый выход.* Исходя из научных задач чувствительность БКП должна быть максимальной, поэтому необходимо использовать ПИ с максимальным возможным квантовым выходом.

*Время жизни детектора.* Детектор должен сохранять приемлемые характеристики в условиях космической радиации в течение всего времени функционирования космического аппарата (не менее 5 лет).

*Спектральный диапазон детекторов оптической камеры.* Предпочтение следует отдать приемникам с расширенным в сторону УФ и ИК диапазоном.

Частичное перекрытие в УФ диапазоне областей чувствительности оптических и УФ камер позволит увеличить достоверность наблюдений, а также может служить элементом резервирования систем космического аппарата в случае отказа одной из камер.

*Пространственная модуляция детектора.* Неоднородность чувствительности внутри и между пикселями ПИ должна быть сведена к минимуму, поскольку при обработке данных с БКП возможно использовать математические алгоритмы с целью получения максимального углового разрешения снимков. Для улучшения качества обработки составных экспозиций кадры субэкспозиций одного и того же участка небесной сферы могут быть получены с искусственными микродвигами изображения по поверхности ПИ между отдельными кадрами в пределах одного или нескольких пикселей.

*Размер чувствительного элемента.* Как сказано выше, авторы считают оптимальным выбор критерия К2, что для существующих оценок качества ФРТ соответствует размеру пиксела около 15 мкм. Желательно иметь возможность оперативного увеличения размера пиксела во время полета, например, используя режим бинирования для ПЗС-приемника, для достижения максимальной проникающей способности на отдельных снимках, а также для случая ухудшения оптических параметров телескопа во время запуска или по иным техническим причинам.

## Выбор типа ПИ для ОКП

В качестве приемников излучения для ОКП рассматривались:

*Приемники на базе микроканальных пластин с кодирующим анодом.* Данный вид ПИ обладает приемлемым квантовым выходом, малым темновым током, практически нулевым шумом считывания и достаточно хорошо отработан. К недостаткам следует отнести отсутствие физических элементов изображения (пикселей), что потенциально может приводить к геометрическим искажениям; наличие эффекта насыщения и существование мертвого времени, что уменьшает динамический диапазон; сложность реализации.

*Приемники на основе активной КМОП-ячейки.* Твердотельные ПИ на базе активной КМОП-ячейки активно развиваются в последние годы. Они отличаются простотой, относительной дешевизной и достаточно высокими характеристиками. Вместе с тем в настоящее время по-прежнему не удается понизить уровень шумов считывания и поднять квантовый выход приемников на базе КМОП-ячейки до уровня ПЗС-приемников. Еще одним недостатком таких ПИ является неравномерность чувствительности по пикселу из-за наличия в каждом пикселе (активной КМОП-ячейке) дополнительной электронной схемы считывания сигнала.

*Приемники с зарядовой связью (ПЗС).* В настоящее время ПЗС являются основным видом приемников для получения высокоточных астрономических данных в оптическом диапазоне спектра для наземных и многих космических аппаратов. Современные ПЗС обладают очень высокой чувствитель-

ностью, высокими линейностью и стабильностью, большим динамическим диапазоном.

Долгое время радиационная стойкость ПЗС была недостаточно высокой для продолжительных космических миссий, однако в последнее время появились и достаточно хорошо отработаны ПЗС, способные работать в режиме МРР (Multi-pinned phase), что позволило существенно уменьшить темновой ток и поднять радиационную стойкость ПЗС до приемлемого уровня.

При выборе между различными построениями ПЗС-приемников (чтение полного кадра, перенос кадра, межстрочный перенос) необходимо исходить из поставленных научных задач ОКП. Требование максимальной чувствительности ПИ, равномерной чувствительности внутри одного пикселя и отсутствие требований по высокой скорости считывания делают предпочтительным использование ПЗС-приемников с чтением полного кадра. В этом случае необходимо введение в состав ОКП механического затвора для предотвращения появления в процессе считывания ПЗС-приемника “смаза” от ярких объектов, ухудшающих точность фотометрической обработки изображений.

В табл. 1 приведены средние параметры, достигаемые у лучших образцов ПИ трех типов. Анализ данных показывает, что у детекторов на базе технологии ПЗС достигается максимальная чувствительность, стабильность и линейность. Необходимость использования дополнительного охлаждения и защиты от радиации в случае использования ПЗС неизбежно приводит к усложнению конструкции БКП, однако оно обосновано, поскольку основной задачей БКП является получение высококачественных

**Таблица 1.** Сравнение характеристик различных приемников излучения для оптической камеры поля

Параметр	ПЗС	КМОП	МКП
Спектральный диапазон	Видимый, УФ	видимый	УФ, видимый
Квантовый выход	до 90%	до 50%	≈20%
Формат	до 4×4 к	3×4 к и более	2×2 к
Размер пикселя, мкм	6–24	3–15	15–30
Шум считывания, е <sup>-</sup> СКО	>2	20–30	—
Темновой ток, е <sup>-</sup> при +20 °С	100	500	0,01
Емкость ячейки, е <sup>-</sup>	70 к–300 к	60 к–300 к	—
Скорость счета, имп/сек.	—	—	3×10 <sup>5</sup>
Радиационная стойкость	низкая, средняя	средняя, высокая	высокая
Рабочая температура, °С	до –120	до –85	+20
Ресурс чувствительной поверхн., фот./мм <sup>2</sup>	—	—	10 <sup>11</sup>
Охлаждение	да	да	нет (да)
Опыт применения детектора	высокий	малый	средний
Высоковольтный источник напряжения	нет	нет	да

Таблица 2. Основные параметры избранных ПЗС-приемников

Название, фирма-изготовитель	Формат	Размер пиксела, мкм	Размер светочувствительной области, мм	Обрат. освещ.	МРР	Спектральный диапазон, нм	Квант. выход, %	Шум счит., e <sup>-</sup> СКО	Емкость ячейки, 10 <sup>3</sup> e <sup>-</sup>	Динамический диапазон	Темновой ток	Кол-во выходных усилителей
CCD 42-40 E2V	2048×2048	13,5	27,6×27,6	+	+	200–1060	75–90	3	100	33333:1	250 e <sup>-</sup> +20 °С	2
CCD55-20 E2V	770×1152	22,5	17,3×25,9	+	+	200–1100	н/д	3	450	133000:1	200 e <sup>-</sup> +20 °С	1 Hi gain 1 Low gain
CCD 55-30 E2V	1252×1152	22,5	28×26	—	+	420–1060	45	3,8	400	133000:1	200 e <sup>-</sup> +20 °С	1 Hi gain 1 Low gain
CCD 47-10 E2V	1024×1024	13,3	13,3×13,3	+	+	200–1100	65	2	100	50000:1	250 e <sup>-</sup> +20 °С	2
CCD447 Fairchild	2048×2048	15	30,7×30,7	+	+	200–1100	90	4	100	25000:1	25 пА/см <sup>2</sup> +25 °С	2 Low noise 2 Hi speed
SI-424A SITE	2048×2048	24	49×49	+	+	200–1100	70	7	200	28000:1	50 пА/см <sup>2</sup> +20 °С	4
SI033B SITE	1024×1024	24	24,6×24,6	+	+	200–1100	80	7	350	70000:1	50 пА/см <sup>2</sup> +20 °С	2 Low noise 2 Hi speed
SI100A SITE	2048×2048	12	24,6×24,6	+	+	200–1100	80	6	110	70000:1	10 пА/см <sup>2</sup> +20 °С	2 Low noise 2 Hi speed

снимков с максимально возможной проникающей способностью и угловым разрешением.

Таким образом, в качестве ПИ для ОКП рекомендуется использовать подходящие по геометрическим размерам современные ПЗС-приемники с увеличенной радиационной стойкостью, максимальной чувствительностью и широким спектральным диапазоном.

### Обзор доступных ПЗС-приемников, их параметры

Ведущими производителями ПЗС-приемников для научных целей являются компании E2V Technologies, Fairchild Imaging, SITE, Kodak, Sony, Atmel, Hamamatsu, НПО “Электрон”.

В соответствии с требованиями для ОКП, ПИ должен иметь размер фоточувствительной области около 30×30 мм<sup>2</sup>, сохранять работоспособность при температурах порядка -70 °С и обеспечивать максимальную чувствительность. ПЗС с указанными характеристиками серийно выпускаются только тремя фирмами: E2V Technologies, Fairchild Imaging, SITE.

В табл. 2 представлены основные характеристики избранных ПЗС-приемников, приводимые в материалах фирм-изготовителей [10, 11, 12].

На рис. 1, 2, 3 приведены спектральные кривые для ПЗС-приемников CCD42-40, CCD447 и CCD S100A соответственно.

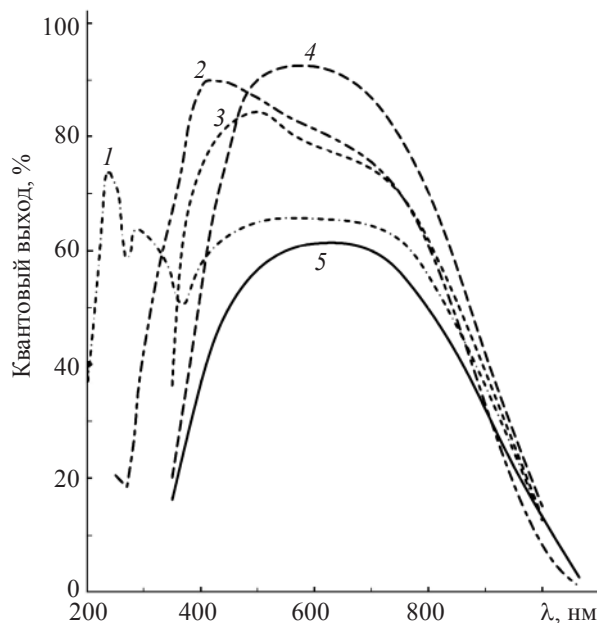


Рис. 1. Квантовый выход CCD 42-40 с обратным освещением. 1 – УФ-покрытие, 2 – улучшенное широкополосное покрытие, 3 – обычное широкополосное покрытие, 4 – среднеполосное покрытие, 5 – без покрытия.

## Рекомендуемые ПЗС-приемники для ОКП

Среди наиболее подходящих ПЗС-приемников для оптической камеры можно выделить CCD 42-40, CCD447, S100A. Указанные ПИ имеют широкий спектральный диапазон, покрывающий ближний УФ и ИК, высокий квантовый выход, низкий уровень шумов и могут работать в режиме МРР, обеспечивая приемлемые параметры радиационной стойкости. ПЗС-приемники с обратной засветкой обладают большим квантовым выходом, особенно в области ближнего ультрафиолета (рис. 2, 3).

По отдельному заказу на поверхность ПЗС-детектора может быть нанесен дополнительный слой,

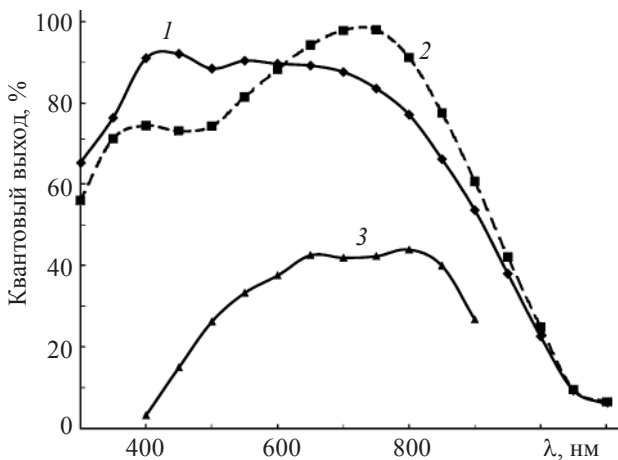


Рис. 2. Квантовый выход CCD447. 1 – обратное освещение и УФ-покрытие, 2 – обратное освещение и широкополосное покрытие, 3 – прямое освещение без покрытия.

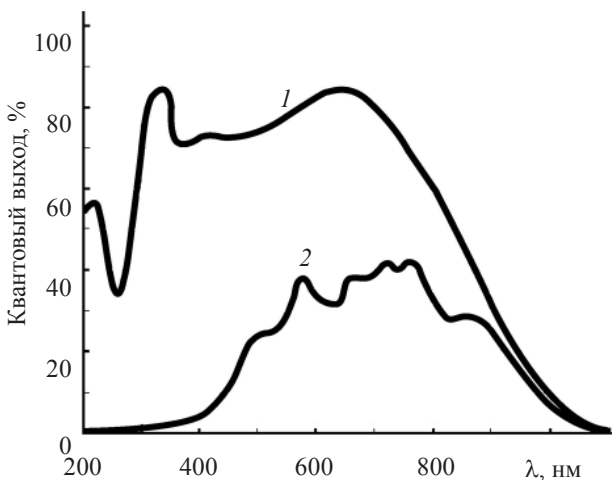


Рис. 3. Квантовый выход CCD S100A. 1 – обратное освещение, 2 – прямое освещение.

увеличивающий квантовый выход ПИ для определенных длин волн (обычно используется для увеличения УФ-чувствительности). Необходимость применения подобных покрытий для ПИ ОКП требует более детальной проработки.

В случае, если окончательный расчет оптического тракта ОКП покажет увеличение полуширины ФРТ, возможно использование ПЗС-приемников CCD55-20 и SI033B, характеристики которых близки к рекомендованным CCD 42-40 и S100A соответственно, за исключением увеличенного размера пиксела (табл. 4).

## Режимы эксплуатации ПЗС-приемника в составе ОКП

Охлаждение и нагрев ПЗС-приемника. При работе с длительными экспозициями до 1 часа темновой ток ПЗС-приемника должен быть не более  $0,01 \text{ e}^- \text{ c}^{-1} \text{ пкс}^{-1}$ , что для рекомендованных типов ПЗС-приемников соответствует рабочей температуре в диапазоне  $-60 \text{—} 80 \text{ }^\circ\text{C}$ . В настоящее время рассматриваются два способа охлаждения ПЗС-приемника до указанных температур: многоступенчатый термоэлектрическим охладителем или с помощью внешнего радиатора.

Под воздействием радиации в структуре ПЗС-приемника образуется большое число аномальных зон, приводящих к появлению “горячих” пикселей, ухудшению коэффициента переноса заряда, образованию электронных ловушек.

Как показывает опыт работы камер телескопа им. Хаббла, нагрев ПЗС-кристалла до температуры  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение нескольких часов позволяет нейтрализовать большую часть новых “горячих” пикселей, а также способствует очистке поверхности ПЗС-кристалла от загрязнений, осаждающихся на холодной поверхности. Периодичность данной процедуры нагрева составляет один месяц.

Таким образом, конструкция ОКП должна обеспечивать возможность периодического нагрева ПЗС-приемника до температуры порядка  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Радиационная защита. Рекомендуется использовать ПЗС-приемники с увеличенной радиационной стойкостью, работающие в режиме МРР, а также использовать дополнительное экранирование.

Эффективность переноса. Для уменьшения эффектов, связанных с неэффективностью переноса заряда, возможно считывание ПЗС-приемника с использованием нескольких считывающих устройств.

Искусственные микросдвиги. Для улучшения качества фильтрации изображения от следов космических частиц и учета дефектов ПЗС-приемника рекомендуется разбивать каждую экспозицию на 2

или более субэкспозиции с введением искусственных микросдвигов изображения по поверхности ПИ между отдельными кадрами в пределах одного или нескольких пикселей. Подобные микросдвиги могут быть реализованы путем перенаведения телескопа.

Калибровка ПЗС-приемника ОКП. Для калибровки ПЗС-приемника ОКП в процессе полета необходимо периодическое получение кадров калибровок: кадров подложки (bias), кадров темнового тока (dark), кадров плоского поля (flat field).

Кадры подложки и темнового тока возможно получать с закрытым затвором камеры и, возможно, с закрытой крышкой телескопа. Для фильтрации следов космических частиц рекомендуется получение нескольких кадров подряд с последующей обработкой.

С помощью кадров плоского поля осуществляется учет неравномерности чувствительности отдельных пикселей, а также неоднородности, связанных с оптической системой телескопа.

Во время наземных испытаний телескопа возможно получение базовых кадров плоского поля.

В условиях космического полета получение прямых кадров плоского поля практически невозможно, поскольку для этого необходима равномерная засветка телескопа с внешней стороны. Тем не менее, кадры плоского поля могут быть реализованы путем комбинации кадров, полученных разными способами, аналогично тому, как это происходит на телескопе им. Хаббла.

В кадре плоского поля можно условно выделить высокочастотную составляющую, связанную с неоднородностью чувствительности соседних пикселей ПЗС-приемника, и низкочастотную, связанную с оптической системой, бликами, пылинками и т.п.

Получение кадров высокочастотной составляющей возможно при включении в состав камеры канала калибровки, состоящего из ламп оптического и УФ диапазонов и дополнительной оптики.

Низкочастотная составляющая может быть получена из анализа многократных снимков звездных скоплений. Также стоит рассмотреть возможность получения кадров поверхности земли.

Итоговый калибровочный кадр плоского поля можно скомбинировать из кадров, полученных всеми рассмотренными выше способами.

### Оценка чувствительности в различных режимах

Оценку чувствительности проведем для точечного астрономического объекта. В качестве ПИ будем использовать ПЗС-приемник с обратным ос-

вещением и размером пиксела  $15 \times 15$  мкм, темновым током  $0,01 \text{ e}^- \text{ c}^{-1} \text{ пкс}^{-1}$ , шумом считывания  $5 \text{ e}^-$  (СКО). Воспользуемся следующими стандартными формулами:

Отношение с/ш для всего изображения источника определяется как

$$S/N = n_\lambda / \left( \sqrt{kn_d + n_{BG} + k_{bin}R_n^2 + SL + n_\lambda} \right), \quad (1)$$

где  $n_\lambda$  – количество электронов от объекта, зарегистрированных за время экспонирования,  $n_d$  – количество темновых электронов ( $n_d = DNt$ ),  $SL$  – рассеянный свет,  $n_{BG}$  – количество электронов от фона неба, зарегистрированных за время экспонирования ( $n_{BG} = Bkt$ ),  $B$  – количество электронов от фона неба, зарегистрированных за 1 с в одном пикселе,  $R_n$  – шум считывания,  $t$  – время экспонирования,  $k$  – число пикселей в изображении источника,  $k_{bin}$  – число пикселей в изображении источника с учетом бинирования,  $DN$  – темновой ток при заданной температуре ( $T$  °C) чувствительной поверхности ПИ.

Предварительно оценивается уровень сигнала от эталонированного источника (фона), который определяется как

$$n_\lambda = St, \quad (2)$$

$$S = D_{ef} \cdot \partial N(\Delta\lambda) \tau(\Delta\lambda) \Delta\lambda, \quad (3)$$

где  $S$  – количество электронов от объекта, зарегистрированных за 1 с,  $D_{ef}$  – эффективная апертура (площадь зеркала),  $\partial$  – доля энергии изображения звезды (фона) в используемой области чувствительной поверхности ПИ,  $N(\Delta\lambda)$  – спектральная плотность фотонной освещенности от звезды на входе телескопа в заданной полосе длин волн,  $\tau(\Delta\lambda)$  – спектральное пропускание оптической системы (телескоп и вспомогательные оптические элементы ОКП, включая фильтры) в заданной полосе длин волн,  $\Delta\lambda$  – ширина используемой спектральной полосы.

Оценка проводилась для звезды спектрального класса A0 с блеском  $V = 0^m$ , полагая ее эталонированным источником.

Фоновый поток от небесной сферы принимался эквивалентным  $26^m$  с угл. кв. сек. Масштаб изображения на фокальной поверхности телескопа T-170M составляет 12 угл. сек./мм, диапазон линейных перемещений ФРТ по чувствительной поверхности ПИ  $\pm 8,2$  мкм (соответствует максимальной амплитуде угловых колебаний космического аппарата  $\pm 0,1$  угл. сек.), принимая спектральный квантовый выход ПИ в заданной полосе длин волн,  $\eta(\Delta\lambda) = 0,8$ .

Тогда, считая

$D_{ef} = 2,1 \times 10^4 \text{ см}^2$ ,  $\tau(\Delta\lambda) = 0,5$ ,  $\Delta\lambda = 8 \times 10^2 \text{ \AA}$ ,  
 $N(\Delta\lambda) = N_0(V0^m) = 1,3 \times 10^3 \text{ фотонов/с/см}^2/\text{ \AA}$ ,  $t = 1 \text{ с}$ .

$\partial = 0,9$ , что соответствует существующему (предварительному) качеству ФРТ, представленному в двух вариантах:

Вариант 1 (В1): 90% ( $\partial = 0,9$ ) энергии ФРТ с учетом параметров стабилизации сосредоточено в кружке диаметром 44 мкм (3×3 пкс),

Вариант 2 (В2): 90% ( $\partial = 0,9$ ) энергии ФРТ с учетом параметров стабилизации сосредоточено в кружке диаметром 54 мкм (4×4 пкс),

получим  $S_{0(\partial=0,9)} = 7,9 \times 10^9 \text{ е}^-/\text{с}$ .

Принимая для фонового потока  $N(\Delta\lambda) = N_{BG} = 6,2 \times 10^{-8} \text{ фотонов/с/см}^2/\text{ \AA}$ , угловой размер пикселя равным 0,033 угл. кв. с, соответствующий  $\partial = 0,03$ ; и при остальных неизменных условиях получим  $B = 1,3 \times 10^{-6} \text{ е}^-/\text{с/пкс}$ .

На существующем этапе проектирования учесть влияние рассеянного света не представляется возможным. Тем не менее, влияние указанного фактора следует минимизировать как за счет качества конструкции телескопа, так и путем рационального планирования наблюдений.

Учитывая сказанное и полагая  $DN = 0,01 \text{ е}^-/\text{с/пкс}$  ( $T = -60 \text{--} -70 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $R_n = 5 \text{ е}^-$  (СКО), а также пренебрегая  $B = 1,3 \times 10^{-6} \text{ е}^-/\text{с/пкс}$  в сравнении с  $DN$ , преобразуем формулу (1) к виду

$$S/N = n_\lambda / \left( \sqrt{kn_d + k_{bin} R_n^2 + n_\lambda} \right). \quad (4)$$

Звездная величина определяется исходя из следующего стандартного соотношения [2]:

$$m_2 - m_1 = 2,5 \lg \left( E'_{m_1} / E'_{m_2} \right), \quad (5)$$

где  $m_2, m_1$  – звездные величины сравниваемых объектов,  $E'_{m_1}, E'_{m_2}$  – соответствующие им освещенности на чувствительной поверхности ПИ.

Тогда полагая отклик ПИ линейным,  $m_v = m_1$ ,  $m_2 = m_0 = 0$  и  $\partial$  постоянной величиной, преобразуем (5) к виду

$$m_v = -2,5 \lg \left( n_\lambda / N_{\lambda_0} \right). \quad (6)$$

Результаты оценок чувствительности ОКП для различных вариантов параметров ФРТ (В1/В2), различных критериев (К2/К3) и режимов работы представлены в табл. 3 и 4. Оценка предельной звездной величины с использованием бинирования и без него дана для различных отношений с/ш и экспозиций 10 мин, 1 час, 1 час с суммированием 6 кадров по 10 мин.

В случае использования бинирования реализован переход от критерия К2 к К3, что, принимая во внимание погрешность наведения телескопа, предполагает сосредоточение 90% энергии ФРТ для варианта В1 в зоне 4×4 пкс, а для В2 – 5×5 пкс.

**Таблица 3.** Результаты оценок чувствительности ОКП для варианта В1

Время экспозиции, с; ее тип	$6 \times 10^2$	$3,6 \times 10^3$	$3,6 \times 10^3$ , 6 субэкспозиций	$6 \times 10^2$ , бинирование	$3,6 \times 10^3$ , бинирование	$3,6 \times 10^3$ , 6 субэкспозиций, бинирование
$k_{bin} R_n^2$	$225 \text{ е}^-$	$225 \text{ е}^-$	$1350 \text{ е}^-$	$25 \text{ е}^-$	$25 \text{ е}^-$	$150 \text{ е}^-$
$kn_d$	$54 \text{ е}^-$	$324 \text{ е}^-$	$324 \text{ е}^-$	$96 \text{ е}^-$	$576 \text{ е}^-$	$576 \text{ е}^-$
с/ш = 3	$27,4^m$	$29,5^m$	$29,3^m$	$29,1^m$	$29,5^m$	$29,5^m$
с/ш = 10	$26,8^m$	$27,4^m$	$27,2^m$	$26,9^m$	$27,4^m$	$27,3^m$
с/ш = 100	$22,1^m$	$24,6^m$	$22,5^m$	$22,1^m$	$24,4^m$	$24^m$

**Таблица 4.** Результаты оценок чувствительности ОКП для варианта В2

Время экспозиции, с; ее тип	$6 \times 10^2$	$3,6 \times 10^3$	$3,6 \times 10^3$ , 6 субэкспозиций	$6 \times 10^2$ , бинирование	$3,6 \times 10^3$ , бинирование	$3,6 \times 10^3$ , 6 субэкспозиций, бинирование
$k_{bin} R_n^2$	$400 \text{ е}^-$	$400 \text{ е}^-$	$2400 \text{ е}^-$	$25 \text{ е}^-$	$25 \text{ е}^-$	$150 \text{ е}^-$
$kn_d$	$96 \text{ е}^-$	$576 \text{ е}^-$	$576 \text{ е}^-$	$150 \text{ е}^-$	$900 \text{ е}^-$	$900 \text{ е}^-$
с/ш = 3	$27,3^m$	$29,4^m$	$29,2^m$	$29^m$	$29,4^m$	$29,4^m$
с/ш = 10	$26,7^m$	$27,3^m$	$27,1^m$	$26,8^m$	$27,4^m$	$27,2^m$
с/ш = 100	$22,1^m$	$24,6^m$	$22,5^m$	$22,1^m$	$24,4^m$	$24^m$

Данные оценки звездных величин получены для частного случая. Более подробный анализ потребует проведения дополнительных исследований и уточнения параметров ОКП.

### Выводы

Основываясь на исходных технических характеристиках БКП, научных задачах для БКП, анализе различных видов ПИ и опыте эксплуатации камер поля на телескопе им. Хаббла, можно дать следующие рекомендации по характеристикам ПИ для ОКП:

В качестве ПИ для ОКП использовать ПЗС-приемник с чтением полного кадра (Full frame).

ПЗС-приемник с чтением полного кадра требуется в составе камер механического затвора.

Для обеспечения длительных экспозиций ПЗС-приемник нуждается в системе охлаждения до температуры порядка  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зависимости от марки ПЗС.

Должна быть предусмотрена возможность периодического нагрева ПЗС-приемника до температуры порядка  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

С целью уменьшения шумов ПЗС-приемник должен считываться на малой скорости (50–200 кГц).

Для увеличения радиационной стойкости есть возможность использовать ПЗС-приемник, работающий в режиме MPP.

Для достижения максимальной чувствительности необходимо использовать ПЗС с освещением с обратной стороны.

Рекомендуется реализовать режим бинирования.

Для обеспечения возможности калибровки чувствительности ПЗС-приемника необходимо предусмотреть системы для периодического получения калибровочных кадров плоского поля

В качестве пригодных для ОКП приемников излучения можно указать ПЗС-приемники CCD 42-40, CCD447 и S100A.

Полученные предварительные оценки чувствительности ОКП показывают преимущества режима бинирования для поиска слабых объектов при низ-

ком отношении с/ш. Разбиение длинных экспозиций на серии субэкспозиций приводит к уменьшению фотометрической точности при больших отношениях с/ш.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П.* Теоретические основы САПР / Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 14–28.
2. Инженерный справочник по космической технике / Под ред. Солодова А.В. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Воениздат, 1977. 16 с.
3. *Арутюнов П.А.* Теория и применение алгоритмических измерений. М.: Энергоатомиздат, 1990. 38 с.
4. *Изнар А.Н., Павлов А.В., Федоров Б.Ф.* Оптико-электронные приборы космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1972. 368 с.
5. *Фори А.А., Чесноков Ю.М.* Оптимизация и выбор параметров ТВ-камер звездных координаторов // Препринт. Пр-2078. М.: ИКИ РАН, 2003. 14 с.
6. *Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Карелов А.И.* Математическое обеспечение определения ориентации КА по изображениям звездного неба / В сборнике "Оптико-электронные приборы в космических экспериментах". М.: Наука, 1983.
7. *Heyer Birett, et al.* WFPC2 Instrument Handbook, Version 9.0. Baltimore: STScI, 2004. 400 p.
8. *Gonzaga S., et al.* ACS Instrument Handbook, Version 6.0. Baltimore: STScI, 2005. 252 p.
9. *Pavlovsky C., et al.* ACS Data Handbook, Version 4.0. Baltimore: STScI, 2005. 226 p.
10. *Шугаров А.С.* Обоснованный выбор светоприемников для оптических камер поля. Технический отчет ИНАСАН. М.: ИНАСАН, 2006. 23 с.
11. *Мельников В.Г.* Разработка базы данных приемников излучения научных приборов инструментального отсека телескопа Т-170М. Технический отчет ИНАСАН. М.: ИНАСАН, 2004. 30 с.
12. e2v technologies. <http://www.e2vtechnologies.com>.
13. Fairchild imaging. <http://www.fairchildimaging.com>.
14. SITE. <http://www.site-inc.com>.