

# РЕГИСТРАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ НОЧНОГО НЕБА ВИДЕОКАМЕРАМИ С НИЗКИМ ПОРОГОМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

*А. А. Бобков, Л. И. Зыков, С. П. Смышляев, А. Ю. Сюдюков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Засорение околоземного космического пространства становится проблемой, которая представляет опасность для пилотируемых полетов и эксплуатации автоматических космических аппаратов. По разным оценкам, вокруг Земли обращается более 700 тысяч техногенных объектов размерами более 1 см [1]. Проблема контроля космического пространства становится актуальной, как с позиций защиты от столкновения с «космическим мусором» [2–3], так и с позиций астероидной опасности [4].

При регистрации слабосветящихся космических объектов (звезды, нефункционирующие КА) на фоне ночного неба требуются видеокамеры, обладающие высокой чувствительностью и низким уровнем собственных шумов. К таким видеокамерам, сочетающим эти свойства, можно отнести видеокамеры с усилителем яркости (ICCD) [8], с электронным умножением сигнала (EMCCD) [5, 6], а также видеокамеры, построенные на фотоприемных научных КМОП матрицах (sCMOS [5, 6]).

Целью работы являлось испытание конкретных образцов видеокамер на указанных принципах построения, определение порога их чувствительности и выбор видеокамеры, позволяющей получить лучшее качество визуализации космических объектов (большее отношение сигнал/шум) на фоне ночного неба.

## Характеристики исследуемых видеокамер

В табл. 1 приведены характеристики исследованных видеокамер SIM-ICCD, Andor iXon 860 и Dhyana 400D, выписанные из паспортных данных, даваемых производителем. Испытываемая видеокамера SIM-ICCD построена на основе кремниевой видеокамеры Sony XC-ST70CE. По сравнению с образцом от изготовителя (Германия) матрица камеры была сопряжена при помощи волоконной шайбы с отечественным электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) имеющим фотокатод типа ФПМ-4-1 от производителя НПО «Геофизика – НВ». Подробное описание принципа работы такого типа видеокамер приведено в работе [8].

Видеокамера Andor iXon 860 построена по технологии EMCCD (Electron Multiplying Charge-Coupled Device) с электронным умножением сигнала до 1000 раз. Причем, сигнал усиливается выше уров-

ня шума считывания усилителя, что приводит к более высокой чувствительности по сравнению с ПЗС (приборы с зарядовой связью) видеокамерами [6, 8]. В видеокамере Andor iXon 860 используется фотоприемная ПЗС матрица CCD60 от фирмы E2V.

В видеокамере Dhyana 400D применяется фотоприемная матрица FL-400, созданная по технологии научного КМОП (sCMOS). Такого типа фотоприемные матрицы имеют раздвоенную схему считывания, в которой верхняя и нижняя половинки матрицы считываются независимо друг от друга. Каждый столбец в каждой половине сенсора оснащен двумя усилителями и двумя аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), в результате этого удается достигать низких значений шума считывания, как следствие высокого динамического диапазона [6].

Из табл. 1 видно, что самый минимальный (3,1×3,1 мм) и максимальный размер (13,3×13,3 мм) фотоприемной матрицы у видеокамеры Andor iXon 860 и Dhyana 400D, соответственно. Пиксель наибольшего размера равен 17,5 и 24 мкм имеют видеокамеры SIM-ICCD и Andor iXon 860. Наибольший диапазон переключения экспозиции предусмотрен в видеокамере Dhyana 400D (от 13 мкс до 10 с) и видеокамере Andor iXon 860 (от 1 мс до 1 с). Видеокамеры SIM-ICCD, Andor iXon 860 и Dhyana 400D работают в полно кадровом режиме с частотой 25 Гц, 513 и 35 Гц, соответственно. В видеокамерах Andor iXon 860 и Dhyana 400D предусмотрено дополнительное бинирование (объединение) пикселей матриц.

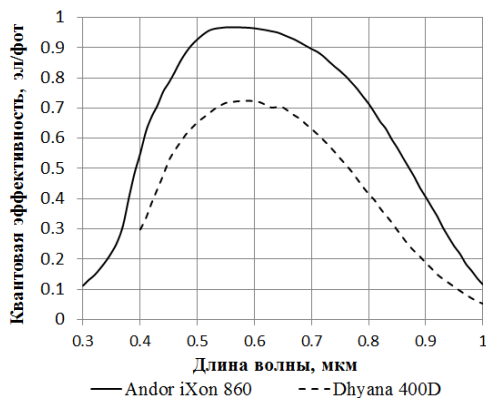
В видеокамерах Andor iXon 860 и Dhyana 400D реализовано охлаждение фотоприемных матриц до -100 и -10 °С, соответственно. За счет их охлаждения удается достигать низких значений темновых токов у видеокамер Andor iXon 860 и Dhyana 400D. Паспортные значения шумов у видеокамеры SIM-ICCD не приводятся.

На рис. 1 приведена зависимость квантовой эффективности видеокамер Andor iXon 860 и Dhyana 400D, а также спектральной чувствительности фотокатода усилителя яркости видеокамеры SIM-ICCD в относительных единицах от длины волны.

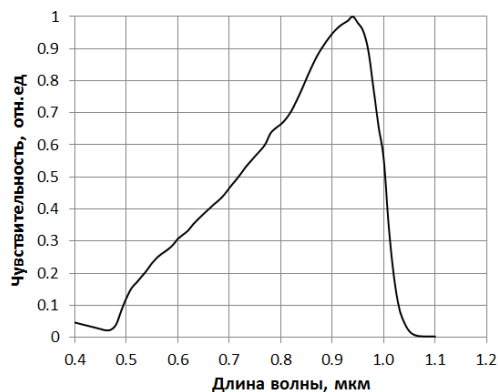
Как видно из рис. 1а, наибольшее значение квантовой эффективности на длине волны 0,55 мкм имеет видеокамера Andor iXon 860 равное 0,95 эл/фот, что в 1,3 раза выше, чем у видеокамеры Dhyana 400D. Из рис. 1б видно, что у видеокамеры SIM-ICCD максимум чувствительности сдвинут в ближнюю инфракрасную область на длину волны 0,95 мкм.

Характеристики исследуемых видеокамер

Видеокамера	SIM-ICCD	Andor iXon 860	Dhyana 400D
Тип и марка матрицы	Sony ICX024AL	ПЗС матрица CCD60 от E2V	Научная КМОП матрица FL-400
Технология усиления входного сигнала	ЭОП с фотокатодом ФПМ-4-1	Дополнительный регистр умножения сигнальных электронов	–
Коэффициент усиления		до 1000 раз	–
Разрешение, пикселей	736×544	128×128	2048×2048
Размер матрицы, мм	12,9×9,5	3,1×3,1	13,3×13,3
Размер пикселя, мкм	17,5×17,5	24×24	6,5×6,5
Биннинг, пкс	–	2×2, 4×4	2×2
Время экспозиции, мс	40	1–1000	0,013–10000
Частота кадров, Гц	25	513 (в полнокадровом режиме)	35 (в полнокадровом режиме)
Глубина потенциальной ямы, $ke^-$		160	30
Темновой ток, эл/сек		0,002 (при $T = -85^\circ C$ )	0,35 (при $T = -10^\circ C$ )
Шум считывания, эл		< 1	1,3
Охлаждение, $^\circ C$	–	–80 – воздушное, –100 – жидкостное	–10 – жидкостное
Формат сигнала	Аналоговый, 8 бит	Цифровой, 14 бит	Цифровой, 16 бит



а



б

Рис. 1. Зависимости: а – квантовая эффективность видеокамер Andor iXon 860 и Dhyana 400D; б – спектральная чувствительность фотокатода видеокамеры SIM-ICCD

### Измерение чувствительности исследуемых видеокамер

Для определения чувствительности исследуемых видеокамер снимались их светосигнальные характеристики. Регистрация проводилась в затемненном лабораторном помещении по схеме, приведенной на рис. 2.

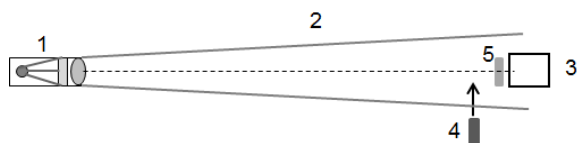


Рис. 2. Схема измерения светосигнальных характеристик: 1 – источник монохроматического света (532 нм), 2 – световой пучок, 3 – исследуемая видеокамера, 4 – измеритель мощности Oriq Nova PD-300, 5 – нейтральные светофильтры

Источник монохроматического света 1, рис.1, на длине волны 532 нм расходящимся пучком 2 освещал фотоприемную матрицу исследуемой видеокамеры 3. Источник монохроматического света 1 был устроен следующим образом. На выходе светодиода с белым светом излучения ставился интерференционный светофильтр выделяющий длину волны 532 нм с шириной полосы 5 нм. Далее свет с помощью линзы с фокусным расстоянием 4 см расширялся в пучок диаметром около 15 см. Расстояние от источника света до фотоприемной матрицы составляло 180 см для видеокамер SIM-ICCD, Andor iXon 860 и 98 см для видеокамеры Dhyana 400D. Сигнал с видеокамеры регистрировался на компьютере. При снятии светосигнальной характеристики поток падающего на матрицу света изменялся путем установки перед видеокамерой нейтральных светофильтров 5. В измерениях использовались светофильтры HC1, HC6,

HC13 размером 80×80 мм толщиной 3 мм и HC6, HC7, HC8, HC9 и HC13 размером 40×40 мм толщиной 2 мм, а также их комбинации. Пропускание светофильтров изменялось в интервале от 0,73 до  $1,2 \cdot 10^{-5}$ . Измерение падающего на матрицу светового потока производилось путем временной постановки светочувствительной площадки измерителя мощности 4 на место фотоприемной матрицы видеокамеры. При измерениях время экспозиции на видеокамерах SIM-ICCD и Dhyana 400D было постоянным и составляло 40 мс. На видеокамере Andor iXon 860 время экспозиции в основном было равно 40 мс, но некоторые точки были сняты при времени экспозиции 20 и 1 мс. В измерениях на видеокамере SIM-ICCD выставлялось максимальное усиление ЭОПа. На видеокамере Andor iXon 860 было выставлено предусиление сигнала равное 4,5 и режим умножения сигнала EM 300.

Число фотонов, упавших на один пиксель фотоприемной матрицы (независимо от того как были накоплены фотоны – при вариации интенсивности светового потока или времени экспозиции) находилось по формуле:

$$N = \frac{Pt_3}{hv}, \quad (1)$$

где  $P$  – измеренная мощность излучения, пересчитанная на один пиксель матрицы;  $t_3$  – время экспозиции, установленное на видеокамере при съемке;  $hv = 3,73 \cdot 10^{-19}$  Дж – энергия фотона на длине волны используемого источника света ( $\lambda = 532$  нм).

Полученные светосигнальные характеристики для видеокамер SIM-ICCD, Andor iXon 860 и Dhyana 400D представлены на рис. 3. Следует отметить, что светосигнальные характеристики видеокамер приведены в своей глубине оцифровки видеосигнала, которая была индивидуальной для каждой камеры. А именно 8, 14 и 16 бит соответственно для видеокамер SIM-ICCD, iXon 860 и Dhyana 400D.

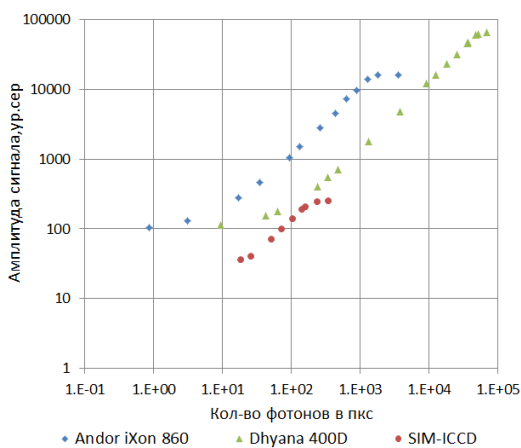


Рис. 3. Светосигнальные характеристики исследуемых видеокамер

По полученным характеристикам определялся угол наклона кривой светосигнальной характеристики на линейном участке, который определяет монохроматическую чувствительность  $s(\lambda)$  видеокамеры.

Найденные значения этих чувствительностей (см. табл. 2) составляют: 1,3 (SIM-ICCD), 10,8 (Andor iXon 860) и 1,2 (Dhyana 400D) ур.сер/фотон. Видеокамера Andor iXon 860 обладает самой высокой чувствительностью на длине волны 532 нм, т. е. дает наибольший отклик на фиксированную порцию монохроматического света с этой длиной волны, а видеокамера Dhyana 400D – наименьший отклик.

При регистрации звезд и космических объектов в широком спектре фотоприемника необходимо пользоваться интегральной чувствительностью  $S$ , которая связана с монохроматической чувствительностью выражением [7]:

$$S = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda)s(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda)d\lambda}, \quad (\text{ур.сер/фотон}), \quad (2)$$

где  $\phi(\lambda)$  (Вт/м<sup>2</sup>·мкм) – падающий на приемник поток излучения,  $s(\lambda)$  (ур.сер/фот) – спектральная чувствительность исследуемой видеокамеры.

Интегральная чувствительность испытанных камер находилась в предположении, что регистрируемый поток от звезды имеет солнечно-подобный спектр. При пересчете от измеренной спектральной чувствительности на длине волны 532 нм на интегральную чувствительность использовалась форма кривой спектральной чувствительности видеокамер от производителя, приведенная на рис. 1. Посчитанные по формуле (2) значения интегральной чувствительности в полосе от 0,4 до 1,1 мкм приведены также в табл. 2. Для сопоставления полученных чувствительностей между собой можно найти долю заполнения динамического диапазона каждой камеры, приходящуюся на один фотон светового воздействия. Это равносильно операции пересчета сигнала на одну цифровую размерность. Прделав, можно получить долю заполнения равную  $1,65 \cdot 10^{-2}$  для камеры SIM-ICCD,  $4,88 \cdot 10^{-4}$  для камеры Andor iXon 860 и  $1,22 \cdot 10^{-5}$  для камеры Dhyana 400D. Из приведенных данных видно, что наибольший отклик в цифровых единицах на воздействующий интегральный свет, дает видеокамера SIM-ICCD, меньший – камера Andor iXon 860 и еще меньше – камера Dhyana 400D.

При регистрации звезд на фоне темного ночного неба важным является порог чувствительности фотоприемника. Согласно [7] пороговая чувствительность – это минимальный поток излучения, который вызывает в видеокамере сигнал, равный уровню собственных шумов. Тогда порог чувствительности фотоприемника к падающему на него интегральному световому потоку будет определяться как:

$$N_{\text{пор}} = \frac{A_{\text{ш}}}{S}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{пор}}$  – порог чувствительности в фотонах,  $A_{\text{ш}}$  – полный шум темного кадра в уровнях серого,  $S$  – интегральная чувствительность видеокамеры.

Чувствительность и порог чувствительности испытанных видеокамер

Марка видеокамеры	Разрядность, бит	Шум темн. кадра, ур.сер	$s$ (532нм), ур.сер/фотон	Интегральная $S$ , ур.сер/фотон	$N_{\text{пор}}$ , фотон	Динамический диапазон
SIM-ICCD	8	7,4	1,3	4,2	1,8	34
Andor iXon	14	10,1	10,8	8	1,3	1620
Dhyana	16	3,1	1,2	0,8	3,9	21000

В табл. 2 приведен, измеренный при закрытой от света фотоприемной матрице, полный темновой шум (с учетом темнового временного шума и пространственного шума) для испытанных видеокамер. Значения шума даны для времени экспозиции 40 мс для каждой видеокамеры со своей глубиной оцифровки и равны: 7,4 ур.сер (8 бит/пкс) для камеры SIM-ICCD, 10,1 ур.сер (14 бит/пкс) для камеры Andor iXon 860 и 3,1 ур.сер (16 бит/пкс) для камеры Dhyana 400D. Найденный по формуле (3) интегральный порог чувствительности исследуемых видеокамер (см. табл. 2) составил 1,3 и 1,8 фотона у видеокамер Andor iXon 860 и SIM-ICCD, соответственно. У видеокамеры Dhyana 400D порог чувствительности оказался больше по величине и равен 3,9 фотона. Для проведения успешной регистрации испытанными видеокамерами звезд на темном ночном небе необходимо заведомо превышать этот порог.

### Регистрация звезд на фоне ночного неба исследуемыми видеокамерами

На рис. 4 приведена оптическая схема регистрации звезд на фоне ночного неба. Исследуемые камеры устанавливались на два одинаковых телескопа и могли регистрировать звезду одновременно. Применялись телескопы ТАЛ-200К, которые имели одинаковое фокусное расстояние 1,7 м и одинаковый диаметр 200 мм входной апертуры. Телескопы закреплялись неподвижно, их оптические оси устанавливались параллельно. Свет от звезды после отражения от зеркала диаметром 760 мм с алюминиевым отражающим покрытием и прохождения телескопов ТАЛ-200К попадал далее на матрицы испытываемых видеокамер. В качестве видеокамеры сравнения использовалась видеокамера Andor iXon 860. Основные технические параметры видеокамер приведены в табл. 1. Зеркало было закреплено на опорно-поворотном устройстве, управление которым осуществлялось через блок управления с помощью компьютера по линии связи Ethernet. Использовалось опорно-поворотное устройство (ОПУ) с приводами от шаговых двигателей. Точность удержания звезды составляла  $\sim 10$  угловых секунд. Все детали оптической схемы были установлены на грунтовой поверхности в переносных легких укрытиях. Высота над уровнем моря, измеренная навигатором Garmin, составляла 150 м.

Кадры изображений с видеокамер записывались на компьютеры управления. При каждом сеансе

наблюдений записывалось 50 кадров видеоизображений. Их обработка проводилась с помощью программы AstroImageJ, количественно определялись интеграл сигнала, размер пятна изображения, амплитуды сигнала, фона, шума и отношение сигнал-шум. При определении отношения сигнал-шум за сигнал принималась средняя амплитуда в изображении звезды (отношение интеграла звезды к площади пятна изображения), а за шум – среднее квадратичное отклонение амплитуды фона рядом с ее изображением в области  $10 \times 10$  пикселей матрицы.

Поле зрения исследуемых видеокамер составляли  $27 \times 27$ ,  $26 \times 19$  и  $6,3 \times 6,3$  угл.мин. соответственно у Dhyana 400D, SIM-ICCD и Andor iXon 860.

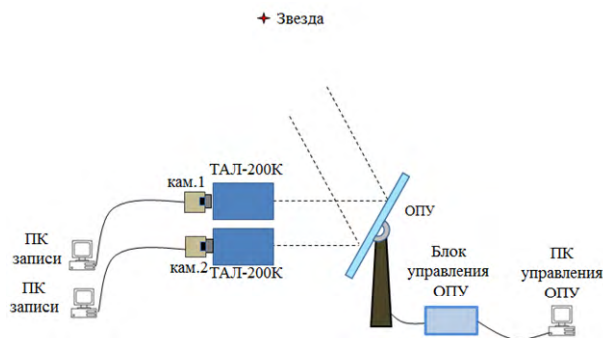


Рис. 4. Схема эксперимента

### Регистрация звезд видеокамерами SIM-ICCD и Andor iXon 860

В табл. 3 приведены условия регистрации звезд с блеском  $9,1^m - 10,2^m$  на фоне ночного неба. Регистрация звезд проводилась 20 июня 2019 г. в периоды с 00:14 до 00:31 и с 22:48 до 22:55 часов местного поясного времени. Во время съемки с 00:14 до 00:31 небо было безоблачное, с 22:48 до 22:55 на небе присутствовали кучевые облака, регистрация проводилась в моменты времени, когда имел место разрыв между кучевыми облаками. Звезды регистрировались при высоте Солнца, изменявшейся в диапазоне от  $-5^\circ$  до  $-11^\circ$ . Угол элонгации, т. е. угловое расстояние от регистрируемой звезды до Солнца, изменялся от  $38^\circ$  до  $93^\circ$ . Яркость ночного неба измерялась предварительно прокалиброванной испытываемой видеокамерой Andor iXon 860 по методике, описанной в [10]. В условиях наблюдений яркость неба (на длине волны 550 нм) изменялась в диапазоне от  $8,2 \times 10^{-5}$  до  $5,6 \times 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>·ср·мкм (от 18 до 15,9 зв.вел./угл.сек<sup>2</sup>),

т. е. примерно в 6,8 раза. Необходимо отметить, что эта яркость неба не была самой минимальной для ночного неба, которая может достигать 22–23 зв.вел/угл.сек<sup>2</sup> [9].

Время экспозиции на испытываемых видеокамерах SIM-ICCD и Andor iXon 860 в оба сеанса регистрации было постоянным, и составляло 40 мс. Следует отметить, что на видеокамере SIM-ICCD изображение звезд с блеском меньше, чем 9,1<sup>m</sup> (т. е. более яркие звезды) находилось в насыщении, поэтому такие звезды не использовались для численного анализа и в табл. 3 не приведены.

На рис. 5 приведены фрагменты снимка звезды SAO 001276 с блеском 9,1<sup>m</sup> с видеокамеры Andor iXon 860, рис. 5а и видеокамеры SIM-ICCD, рис. 5б. Фрагмент представлен в угловом поле зрения равном 3×3 угловых минут.

Рассмотрение снимков, рис. 5, показало, что в поперечнике пятна изображения звезды укладывается 3 пикселя на видеокамере Andor iXon 860 и 6 пикселей на видеокамере SIM-ICCD. В ходе регистрации угловой размер изображения звезд по уровню 0,5 от максимальной амплитуды сигнала в пятне изображения изменялся от 7,4 до 9,8 угловых секунд на видеокамере Andor iXon 860 и от 9,8 до 17,4 угловых

секунд на видеокамере SIM-ICCD. В среднем, угловой размер зарегистрированных звезд на видеокамере SIM-ICCD в 1,8 раза получился выше, чем на видеокамере Andor iXon 860. Причиной этому могут являться абберации, возникающие в оптическом тракте ЭОП видеокамеры SIM-ICCD.

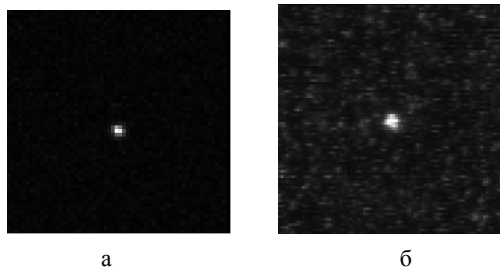


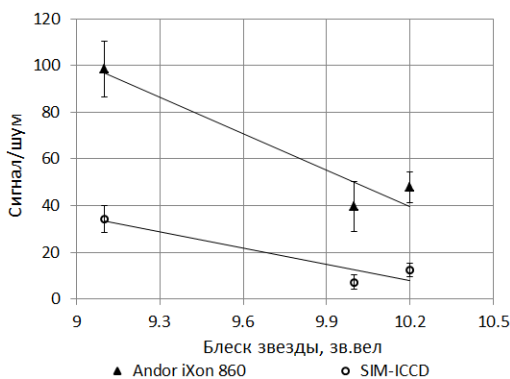
Рис. 5. Фрагменты снимков звезды SAO 001276: а – Andor iXon 860; б – SIM-ICCD

На графиках, представленных на рис. 6, отложены значения отношений сигнал-шум в проведенных регистрациях 20 июня 2019 г. в период с 00:14 до 00:31 часов и с 22:49 до 22:57 часов местного поясного времени в зависимости от блеска зарегистрированных звезд.

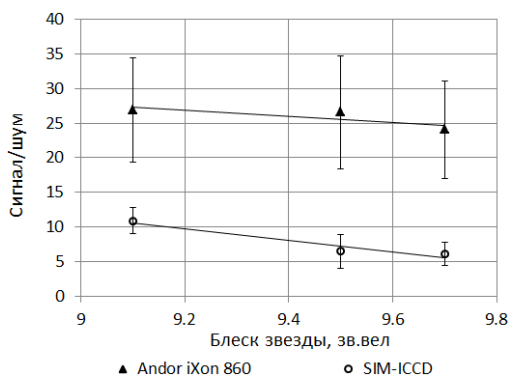
Таблица 3

Условия регистрации звезд с блеском 9,1<sup>m</sup>–10,2<sup>m</sup>

Дата и время регистрации	Название звезды	Блеск и спектр	Координаты Солнца, град	Угол элонгации, град	Яркость неба, Вт/м <sup>2</sup> ·ср·мкм (зв.вел/угл сек <sup>2</sup> )
20.06.19 г, 00:14	SAO 01276	9,1 <sup>m</sup> , G5	$\theta_s = -10,8^0$ , $\phi_s = 347,4^0$	57,3 <sup>0</sup>	$1 \times 10^{-4}$ (17,8)
20.06.19 г, 00:25	PPM 0088081	10 <sup>m</sup> , F0	$\theta_s = -11,1^0$ , $\phi_s = 349,9^0$	93,3 <sup>0</sup>	$8,2 \times 10^{-5}$ (18)
20.06.19 г, 00:31	TYC 3837-884-1	10,2 <sup>m</sup> , F0	$\theta_s = -11,2^0$ , $\phi_s = 351,3^0$	68 <sup>0</sup>	$1,1 \times 10^{-4}$ (17,7)
20.06.19 г, 22:48	SAO 001276	9,1 <sup>m</sup> , G5	$\theta_s = -6,1^0$ , $\phi_s = 328,1^0$	57,4 <sup>0</sup>	$2,8 \times 10^{-4}$ (16,7)
20.06.19 г, 22:50	SAO 014385	9,7 <sup>m</sup> , F2	$\theta_s = -6,6^0$ , $\phi_s = 329,6^0$	68,7 <sup>0</sup>	$5,6 \times 10^{-4}$ (15,9)
20.06.19 г, 22:55	SAO 00023	9,5 <sup>m</sup> , A0	$\theta_s = -6,3^0$ , $\phi_s = 328,5^0$	38,3 <sup>0</sup>	$2,1 \times 10^{-4}$ (17)



а



б

Рис. 6. Зависимость отношения сигнал-шум от блеска звезд в регистрациях 20 июня: а – в период с 00:14 до 00:31 часов; б – с 22:49 до 22:57 часов

Из рис. 6а видно, что для звезд (с блеском от  $9,1^m$  до  $10,2^m$ ) зарегистрированных в первый сеанс, отношение сигнал-шум изменялось от 98 до 40 (т. е. в 2,5 раза) для видеокамеры Andor iXon 860 и от 34 до 7 (т. е. в 4,9 раза) для видеокамеры SIM-ICCD. В этом случае отношение сигнал-шум с видеокамеры Andor iXon 860 в 2,9–5,7 раза выше, чем с видеокамеры SIM-ICCD. Немного отличается поведение отношения сигнал-шум во второй сеанс наблюдения. Из рис. 6б видно, что при изменении блеска регистрируемой звезды от  $9,1^m$  до  $9,7^m$  отношение сигнал-шум для видеокамеры Andor iXon 860 слабо менялось от 27 до 24, а для видеокамеры SIM-ICCD изменялось в 2 раза (от 10 до 5).

Проведенная регистрация 20 июня 2019 г. в разные периоды времени показала, несколько разное поведение регистрирующих видеокамер. Тем не менее, в среднем отношение сигнал-шум с видеокамеры Andor iXon 860 в 3,5 раза больше чем с видеокамеры SIM-ICCD. Ее применение позволяет повысить проникающую способность визуализации звезд приблизительно на 1,4 звездных величины по сравнению с видеокамерой SIM-ICCD.

#### Регистрация звезд видеокамерами Andor iXon 860 и Hamamatsu Orca-flash 4.0

Показавшая лучшие результаты видеокамера Andor iXon 860 была испытана в сравнении с видеокамерой Dhyana 400D. В табл. 4 приведены условия регистрации звезд с блеском  $9,1^m$ – $9,7^m$  на фоне ночного неба. Регистрация проводилась 24 июня 2019 г. в периоды с 22:24 до 22:49 часов местного поясного времени. Во время съемки небо было в легкой дымке, присутствовали высотные перистые облака. Визуально небесная обстановка была более благоприятной, чем при регистрации 20 июня в период с 22:48 до 22:55 часов. Звезды регистрировались при высоте Солнца, изменявшейся в диапазоне от  $-5^0$  до  $-6^0$ . Угол элонгации, т. е. угловое расстояние от регистрируемой звезды до Солнца, изменялся от  $57^0$  до  $111^0$ . В условиях наблюдений яркость неба изменялась

в диапазоне от  $2,5 \times 10^{-4}$  до  $5,4 \times 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>·ср·мкм (от 16,8 до 16 зв.вел/угл.сек<sup>2</sup>), т. е. примерно в 2,2 раза.

Сравнение видеокамер Andor iXon 860 и Dhyana 400D происходило по регистрации звезд слабой яркости при времени экспозиции 1 и 40 мс.

На рис. 7 приведены фрагменты снимков звезды SAO 001276 с блеском  $9,1^m$  с видеокамеры Andor iXon 860, рис. 7а, и видеокамеры Dhyana 400D, рис. 7б. Фрагмент представлен в угловом поле зрения равном  $3 \times 3$  угловых минут.

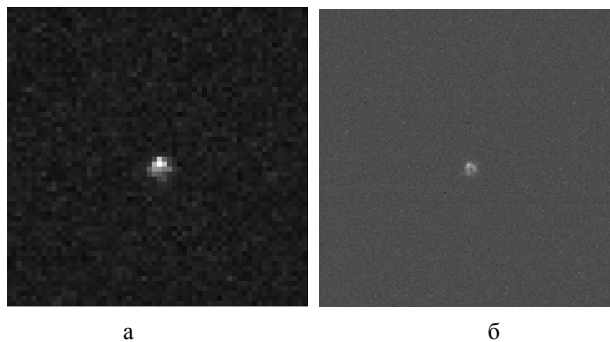


Рис. 7. Фрагменты снимков звезды SAO 001276 при времени экспозиции 40 мс: а – Andor iXon 860; б – Dhyana 400D

Измерение по снимкам показало, что в поперечнике пятна изображения звезды укладывается 5 пикселей на видеокамере Andor iXon 860 и 13 пикселей на видеокамере Dhyana 400D, рис. 7б. Угловой размер изображения звезд по уровню 0,5 от максимальной амплитуды сигнала в пятне изображения для регистрируемых звезд изменялся от 11,7 до 13 угловых секунд на видеокамере Andor iXon 860 и от 8,1 до 9,2 угловых секунд на видеокамере Dhyana 400D. Таким образом, угловой размер зарегистрированных звезд на видеокамере Andor iXon 860 в 1,6 раза (или на 5 угловых секунд) получился выше, чем на видеокамере Dhyana 400D.

На рис. 8 приведены значения отношений сигнал-шум в зависимости от блеска зарегистрированных звезд, снятых при времени экспозиции 1 и 40 мс.

Таблица 4

Условия регистрации звезд с блеском  $5^m$ – $9,9^m$

Дата и время регистрации	Название звезды	Блеск и спектр	Координаты Солнца, град	Угол элонгации, град	Яркость неба, Вт/м <sup>2</sup> ·ср·мкм (зв.вел/угл сек <sup>2</sup> )
20.06.19 г, 22:24	HR 6791	$5^m$ , G5	$\theta_s = -4,1^0$ , $\varphi_s = 322,7^0$	$111,4^0$	$3,2 \times 10^{-4}$ (16,5)
20.06.19 г, 22:28	SAO 030380	$6,5^m$ , G0	$\theta_s = -4,5^0$ , $\varphi_s = 323,6^0$	$100,3^0$	$5,4 \times 10^{-4}$ (16)
24.06.19 г, 22:37	SAO 046152	$7,4^m$ , G5	$\theta_s = -5,2^0$ , $\varphi_s = 325,4^0$	$106,2^0$	$2,5 \times 10^{-4}$ (16,8)
20.06.19 г, 22:42	SAO 062889	$8,5^m$ , G5	$\theta_s = -5,6^0$ , $\varphi_s = 326,5^0$	$64,1^0$	$4,1 \times 10^{-4}$ (16,2)
20.06.19 г, 22:45	SAO 001276	$9,1^m$ , G5	$\theta_s = -5,9^0$ , $\varphi_s = 327,1^0$	$57^0$	$4 \times 10^{-4}$ (16,3)
20.06.19 г, 22:49	SAO 082111	$9,9^m$ , G2	$\theta_s = -6,1^0$ , $\varphi_s = 328^0$	$66,7^0$	$4,2 \times 10^{-4}$ (16,2)



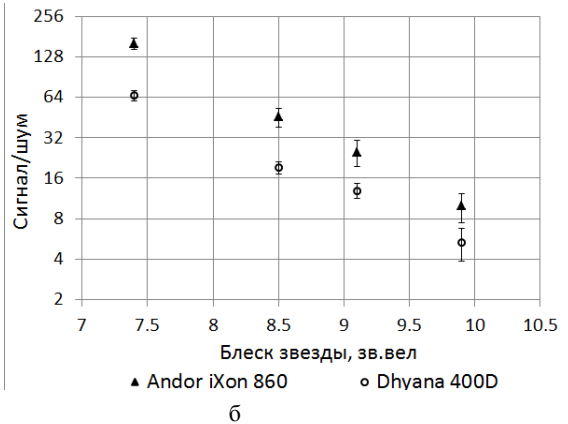
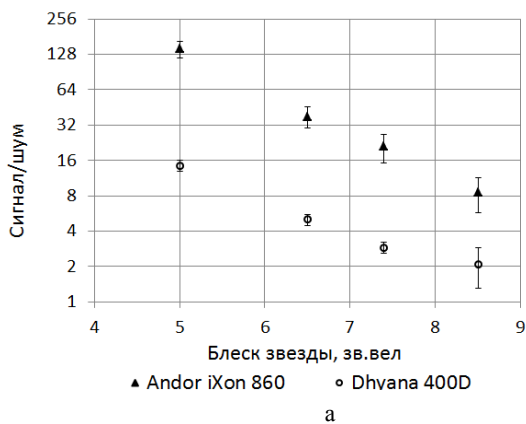


Рис. 8. Зависимость отношения сигнал-шум от блеска звезд снятых при разном времени экспозиции: а – 1 мс; б – 40 мс

При регистрации, проведенной с экспозицией 1 мс на обеих видеокамерах, доступными для наблюдения были звезды с блеском от 5 до 8,5 звездной величины. При этом, как видно из рис. 8а отношение сигнал-шум изменялось от 128 до 8 на видеокамере Andor iXon 860 и от 16 до 2 на видеокамере Dhyana 400D. Таким образом, при времени экспозиции 1 мс, отношение сигнал-шум с видеокамеры Andor iXon 860 от 4 до 8 раз больше, чем с видеокамеры Dhyana 400D. При увеличении времени экспозиции до 40 мс доступными для наблюдения были уже более слабые звезды, с блеском до 10 звездной величины. Из рис. 8б видно, что для зарегистрированных звезд с блеском от 7,4<sup>m</sup> до 9,9<sup>m</sup> отношение сигнал-шум изменялось от 160 до 12 (т. е. в 13,3 раза) для видеокамеры Andor iXon 860 и от 64 до 5 (т. е. в 13 раз) для видеокамеры Dhyana 400D. В этом случае, отношение сигнал-шум с видеокамеры Andor iXon 860 до 2,5 раз выше, чем с видеокамеры Dhyana 400D.

Таким образом, сопоставление результатов с этих видеокамер при съемке звезд на фоне ночного неба с временем экспозиции 1 и 40 мс показало, что отношение сигнал – шум с видеокамеры Andor iXon 860 выше, чем с видеокамеры Dhyana 400D в 8 и 2,5 раза, соответственно.

Объединяя результаты испытаний всех трех видеокамер можно уверенно заметить, что наиболее высокое отношение сигнал-шум при наблюдении звезд на ночном небе дает EMCCD видеокамера Andor iXon 860. Второе место в зависимости от сеанса конкретной регистрации может занимать либо видеокамера SIM-ICCD, либо видеокамера Dhyana 400D. Неопределенность в приоритетности двух последних видеокамер пока не понятна и, возможно, связана с непостоянством воздушной атмосферы и облачности.

### Заключение

Измеренные светосигнальные характеристики и шумы исследованных видеокамер показали, что наименьшим порогом интегральной чувствительности равным 1,3-1,8 фотонов обладают видеокамеры An-

дор iXon 860 и SIM-ICCD. При регистрации камерами сигналов выше порога чувствительности наибольший отклик на световое излучение даст камера SIM-ICCD. Однако эта камера будет давать картинку звездного ночного неба с наибольшими шумами. Камера Dhyana 400D обладает наименьшими (до 600 раз) собственными шумами, но и меньшим порогом чувствительности. На основании анализа светосигнальных характеристик и собственных шумов видеокамер, наиболее лучшей в целях ее применения для визуализации звезд на фоне ночного неба является камера Andor iXon 860. Эта камера показала также наиболее высокое отношение сигнал-шум при наблюдении звезд слабой яркости (5<sup>m</sup>–10<sup>m</sup>) на ночном небе. Другие камеры уступают ей либо по порогу чувствительности, либо из-за более высоких шумов.

### Литература

1. Рыхлова Л. В., Бахтигараев Н. С. Новые проблемы околоземной астрономии / Конференция. Околоземная астрономия – 2009 // Сборник трудов. Москва, 2010. С. 15.
2. Масевич А. Г. Проблема загрязнения космоса (космический мусор). М.: Космосинформ, 1993. С. 150.
3. Свиридов К. Н., Белкин Н. Д. Наземная космическая система для контроля космического мусора // Конверсия в машиностроении, 1997. № 3. С. 36.
4. Артемьева Н. А., Баканас Е. С., Барабанов С. И, Витязев А. В., Волков В. А., Глазачев Д. О., Дегтярь В. Г., Емельяненко В. В., Иванов Б. А., Кочетова О. М., Куликова Н. В., Медведев Ю. Д., Нароенков С. А., Немчинов И. В., Печерникова Г. В., Поль В. Г., Попова О. П., Рыхлова Л. В., Светцов В. В., Симонов А. В., Соколов Л. Л., Тимербаев Р. М., Чернетенко Ю. А., Шор В. А., Шувалов В. В., Шустов Б. М. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под. ред. Шустова Б.М., Рыхловой Л. В. М.: Физматлит, 2013. С. 384.
5. Xingxing W., Jinguo L., Huaide Z., Boyan Z. Research on spaceborne low light detection based on EMCCD and sCMOS // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9674.

6. Коатес К., Фуллер Б., Холст Г. Устранение ограничений при использовании научной КМОП-камеры (sCMOS) // Фотоника. 2016. № 4. С. 102–110.

7. Павлов А. В. Оптико-электронные приборы. М: Энергия, 1974.

8. Digital Camera Fundamentals // [www.andor.com](http://www.andor.com).

9. Мартынов Д. Я. Курс практической астрономии. М.: Наука, 1967.

10. Гаранин С. Г., Зыков Л. И., Климов А. Н., Куликов С. М., Смышляев С. П., Степанов В. В., Сюздюков А. Ю. Дневное наблюдение звезд слабой яркости ( $7^m - 8^m$ ) с равнинной местности. // Оптический журнал. 2017. Т. 84, № 12. С. 30–37.