

# ДНЕВНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЗВЕЗД СЛАБОЙ ЯРКОСТИ ( $7^m - 8^m$ ) ЛЮБИТЕЛЬСКИМ ТЕЛЕСКОПОМ С РАВНИННОЙ МЕСТНОСТИ

Л. И. Зыков, А. Н. Климов, С. М. Куликов, С. П. Смышляев, В. В. Степанов, А. Ю. Сюндюков

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

## Введение

В последние годы в связи с засорением Космоса нефункционирующими искусственными спутниками Земли и их фрагментами, так называемым «космическим мусором» [1–3], и наличием астероидной опасности [2–4], проблема наблюдения космического пространства приобрела особую актуальность как с позиций защиты от столкновения с «космическим мусором», так и с позиций экологической безопасности. Освоение круглосуточного наблюдения звезд необходимо сегодня также для осуществления астронавигации [5].

Наблюдение звездных объектов на фоне ночного неба с помощью небольшого любительского телескопа и видеокамеры не вызывает трудностей вплоть до слабосветящихся объектов с блеском 8-й–13-й звездной величины. Однако наблюдение тех же объектов той же аппаратурой в дневных условиях, начиная с 3-й звездной величины, вызывает уже трудности, все более возрастающие с уменьшением яркости объекта. Ограничение проникающей способности дневного наблюдения решающим образом связано с высоким фоном дневного неба, а также с возросшей турбулентностью атмосферы по сравнению с ночными условиями.

Наблюдению звезд и космических объектов в дневных условиях посвящено ряд работ (см., например, [5–9, 18]), в которых для регистрации применялись относительно крупные астрономические телескопы размещенные в условиях с хорошим астроклиматом, характерным для обсерваторий. Ниже описаны результаты дневных наблюдений звезд слабой яркости осуществленных с равнинной местности средней полосы России с помощью любительского телескопа, оснащенного видеокамерой с кремниевой фотоприемной матрицей.

## Исходные посыпки

Картинка изображения звездного объекта, наблюдаемая через любительский телескоп, имеет вид пятна возвышающегося над окружающим фоном неба. При переходе от ночного к дневному наблюдению из-за значительного, на 7–8 порядков [9], возрастания фона свечения неба изображение объекта слабо возвышается над пьедесталом фона, то есть картинка становится слабоконтрастной. Из-за возрастания турбулентности атмосферы пятно изображения увеличивается в размере, в ходе наблюдения меняет свою конфигурацию, центр тяжести пятна испытывает хаотические перемещения. И если в условиях обсерваторий турбулентность атмосферы позволяет достигать при наблюдении объекта углового разрешения менее единиц угловых секунд, то на равнинной местности разрешение может ухудшаться до 10 угл. сек [10]. Качество картинки на фотоприемной матрице и проникающая способность регистрации в конечном итоге определяется отношением сигнала к шуму, которое применительно к многоэлементным матричным фотоприемникам может быть записано выражением [8, 11]:

$$\frac{J_c}{J_{ш}} = \frac{I_c \eta t_n}{\sqrt{I_\phi \eta t_n + i_T t_n + N_R^2 + \sigma^2}}, \quad (1)$$

где  $I_c$  и  $I_\phi$  – количество фотонов, попавших на пиксель фотоприемной матрицы в секунду, соответственно в пятне сигнала (изображения звезды) и на пиксель засвечиваемый фоном неба,  $\eta$  –

квантовая эффективность фотоприемника (электрон/фотон),  $t_n$  – время накопления сигнала (время экспозиции) пикселя (с),  $i_t$  – темновой ток фотоприемника (электрон/сек),  $N_R$  – шум считывания (электрон),  $\sigma$  – пространственный шум, вызванный неравномерностью чувствительности по поверхности матрицы (в электронах). Необходимо отметить, что пространственный шум, записанный в выражении (1), в ближайших рассуждениях не будет учитываться, поскольку будет иметься в виду, что существуют методы и разработаны алгоритмы подавления (корректировки) этого шума, см. например [12].

Для условий регистрации звездных объектов на фоне дневного неба собственными шумами матрицы по сравнению с фотонным шумом от неба можно пренебречь, и тогда расчетное выражение для отношения сигнал-шум запишется:

$$\frac{J_c}{J_{ш}} \approx \frac{I_c \sqrt{\eta t_n}}{\sqrt{I_\phi}}. \quad (2)$$

Как видно из (2), отношение сигнал-шум растет пропорционально корню квадратному из времени экспозиции. То есть, увеличивая время экспозиции, можно улучшить качество регистрации звезд малой яркости и соответственно повысить проникающую способность регистрации. Однако, здесь надо определить, какую максимальную длительность экспозиции может обеспечить фотоприемник не достигая еще порога насыщения от яркого фона неба. Это максимальное время  $t_{max}$  определяется глубиной потенциальной ямы  $U$  (в электронах) элементарного фотоприемника матрицы и числом фотонов, пришедших на этот элемент от фона неба:

$$t_{max} \approx \frac{U}{I_\phi \eta}. \quad (3)$$

После подстановки (3) в (2) можно получить расчетное выражение для отношения сигнал-шум при работе фотоприемной матрицы с однократной экспозицией максимально возможной длительности:

$$\frac{J_c}{J_{ш}} \approx \frac{I_c}{I_\phi} \sqrt{U}. \quad (4)$$

Принципиально, в дневной визуализации могут быть применены видеокамеры, выполненные на основе как матричных ПЗС (приборы с зарядовой связью) фотоприемников, так и КМОП (комплементарный металл-оксидный полупроводник) фотоприемников. Вопрос состоит в том, чтобы подобрать или специально разработать видеокамеру, способную реализовать длительную экспозицию при сильном свечении дневного неба. И далее на этом сильном фоне зарегистрировать слабое изображение звезды малой яркости.

### Система регистрации и выбор видеокамер

Оптическая схема регистрации звезд на фоне дневного неба приведена на рис. 1. Свет от звезды 1 после отражения от зеркала 2 диаметром 760 мм с алюминиевым отражающим покрытием поступал во входные апертуры телескопов 3 и 4 и далее попадал на матрицы видеокамер 5 и 6. Зеркало 2 было закреплено на опорно-поворотном устройстве (ОПУ), управление которым и «выход на звезды» осуществлялись с помощью компьютера 8. Свет от выбранной звезды фокусировался каждым телескопом на фотоприемную матрицу видеокамеры, расположенную в фокальной плоскости. Оба телескопа имели одинаковое фокусное расстояние 2 м и одинаковый диаметр входной апертуры 200 мм, но разных производителей – это телескоп ТАЛ-200К отечественного производства и телескоп Meade LX200GPS зарубежного производства. Перед матрицами видеокамер устанавливался красный светофильтр 7 типа КС-17. Сигналы изображений с видеокамер записывались на компьютеры 8 и 9. Обработка изображений, проводилась в дальнейшем с помощью программы ImageJ, количественно определялись амплитуды сигнала, фона, шума и отношение сигнал-шум [13]. Полученные результаты анализировались и приведены ниже.

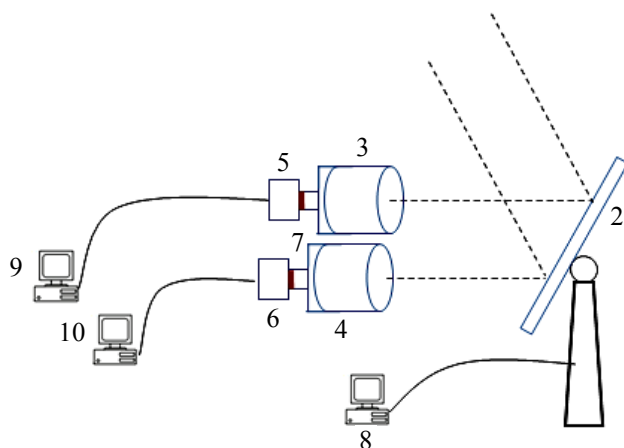
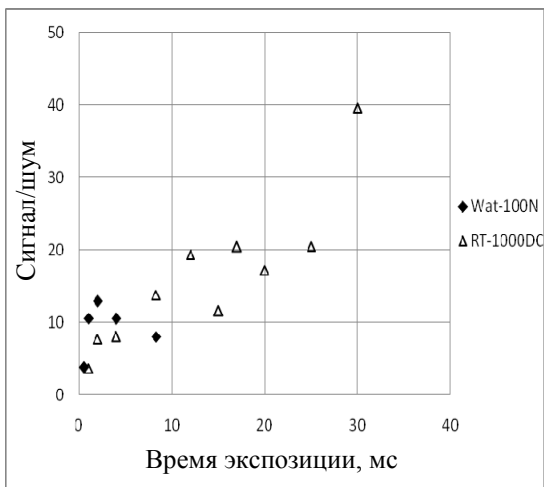


Рис. 1. Оптическая схема наблюдения звезд в дневное время: 1 – регистрируемая звезда; 2 – зеркало на опорно-поворотном устройстве; 3 – телескоп ТАЛ-200К; 4 – телескоп Meade LX200GPS; 5, 6 – испытываемые видеокамеры; 7 – светофильтр КС-17; 8 – компьютер управления ОПУ; 9, 10 – компьютеры управления видеокамерами

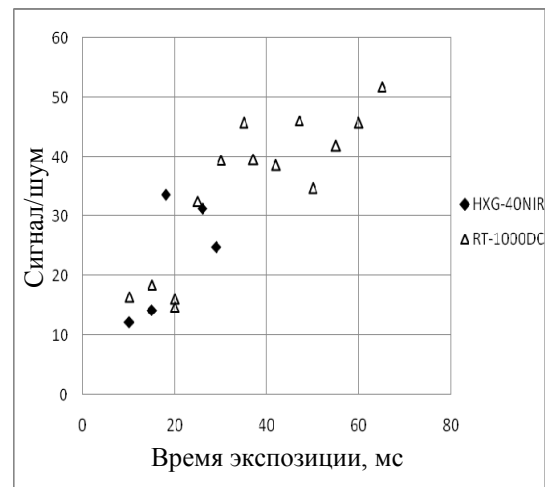
Первоначально для регистрации изображений применялись 4 видеокамеры, среди которых две камеры – это Wat-100N [14] и RT-1000DC [15] имели фотоприемную ПЗС матрицу и две камеры – HXG-40NIR [16] и ВСА-304 [17] имели КМОП матрицу. Наименьшую потенциальную яму (12–13,5 тыс. электронов) имеют видеокамеры Wat-100N и HXG-40NIR, чуть большую (30 тыс. электронов) имеет видеокамера ВСА-304. Наибольшую глубину потенциальной ямы равную 170 тыс. электронов имеет видеокамера RT-1000DC. Видеокамера ВСА-304 осуществляла внутри себя суммирование кадров изображений до экспозиции 40 мс, что при экспозиции одиночного кадра 2 мс соответствовало эффективной глубине потенциальной ямы до 600 тыс электронов.

С целью отбора лучшей видеокамеры для дальнейшей регистрации все видеокамеры предварительно испытывались на регистрации Полярной звезды на фоне дневного небосклона. Регистрация проводилась 10 июля, 14 и 21 сентября 2015 г. от 10:00 до 15:00 часов местного поясного времени. Небо по визуальной оценке представляло собой: небо в кучевых облаках, между ними размазанные слабо выраженные слоистые облака и дымка. Облака перемещались по небосводу, съемка проводилась в моменты времени, когда имел место разрыв между ними. Высота Солнца в ходе наблюдений изменялась от 24 до 52 градусов, угловое расстояние до звезды составляло от 67 до 90 градусов. Значения интегральной яркости свечения дневного неба, измеренные нами в полосе регистрации камеры RT-1000DC за фильтром КС-17, составляли от 1 до 3,7 Вт/м<sup>2</sup>·ср. То есть условия были выражено дневными и близкими к полуденным в это время года.

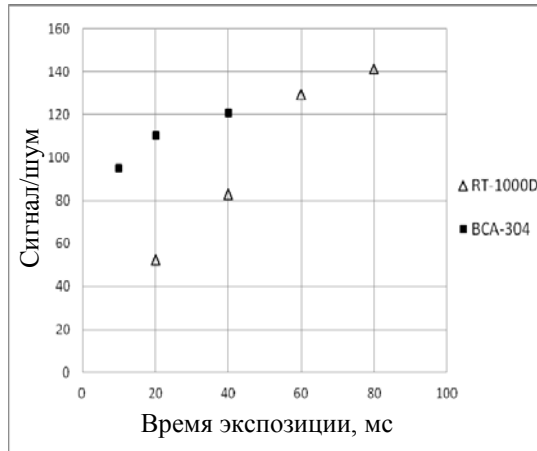
На рис. 2 приведены зависимости отношения сигнал-шум от времени экспозиции для испытываемых видеокамер. Как видно из рисунка, для всех сравниваемых видеокамер отношение сигнал-шум растет с увеличением времени экспозиции, но с разной скоростью. Быстрее оно растет для камеры Wat-100N и достигает примерно 12 при экспозиции 2 мс. Однако для камеры RT-1000DC (см. рис. 2,а) отношение сигнал-шум хотя и растет медленнее, но имеет в 3,3 раза большую величину, достигая 40, но уже при большем времени экспозиции равном 30 мс. Видеокамера RT-1000DC также показывает лучшие результаты в величине отношения сигнал-шум по сравнению с видеокамерой HXG-40NIR (см. рис. 2,б). Отношение сигнал-шум выше 1,6 раза при времени экспозиции 60 мс, по сравнению с регистрацией камерой HXG-40NIR. Видеокамеры RT-1000DC и ВСА-304 показывают близкие между собой отношения сигнал-шум (см. рис. 2,в).



а



б



в

Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум от времени экспозиции при регистрации Полярной звезды видеокамерами: а – Wat-100N и RT-1000DC, яркость фона  $3,7 \text{ Вт/м}^2\text{ср}$  (10.07.15 г.); б – HXG-40NIR и RT-1000DC, яркость фона  $2,2 \text{ Вт/м}^2\text{ср}$  (14.09.15 г.); в – RT-1000DC и BSA-304, яркость фона  $1 \text{ Вт/м}^2\text{ср}$  (21.09.15 г.)

Проведенное испытание камер по регистрации Полярной звезды показало, что увеличение времени экспозиции при применении камер с более глубокой потенциальной ямой или суммированием изображений позволяет повысить отношение сигнал-шум при дневной визуализации звезд. Отметим, что показавшие лучшие результаты видеокамеры RT-1000DC и BSA-304 были разработаны или доработаны с учетом пожеланий авторов.

### Результаты регистрации звезд слабой яркости

Регистрация звезд с блеском  $7^m$  и  $8^m$  на фоне дневного неба проводилась 24, 25 сентября и 1, 14 октября 2015 года с 10:00 ч до 16:00 ч местного поясного времени. Погодные условия в дни регистрации были примерно одинаковые: небесная сфера была без облаков, присутствовала слабая дымка. Отсутствие облаков позволяло выбирать любую звезду, имеющуюся на небосклоне в данное время наблюдения. Основные усилия в проводимых наблюдениях были направлены на обнаружение и регистрацию звезд предельно слабой яркости, то есть – на определение проникающей способности системы визуализации. Для регистрации звезд малой яркости использовались видеокамеры RT-1000DC и BSA-304, показавшие лучшие результаты при наблюдении Полярной звезды.

В таблице приведены условия регистрации звезд с блеском 7<sup>m</sup> и 8<sup>m</sup> на фоне дневного неба. Название звезд, их блеск и классификация спектра взяты из программы StarCalc. Из таблицы видно, что звезды блеском 7<sup>m</sup> и 8<sup>m</sup> регистрировались при высоте Солнца изменяющейся в диапазоне от 12° до 29°. Угол элонгации, т. е. угловое расстояние от регистрируемой звезды до Солнца изменялось от 47° до 113°.

*Условия регистрации звезд с блеском 7<sup>m</sup> и 8<sup>m</sup> на фоне дневного неба*

Дата и время регистрации	Название звезды	Блеск, спектр и цвет	Координаты Солнца, град	Угол элонгации, град	Яркость неба, Вт/м <sup>2</sup> ·ср (зв.вел/угл.сек <sup>2</sup> )	Тип видеокамеры
24.09.15 г. 16-00	Мю-2 Волопаса	7 <sup>m</sup> , K0, оранж.	$\theta_s = 16,2^\circ$ , $\varphi_s = 244,7^\circ$	59,7°	0,96 (4,62)	BCA-304
25.09.15 г. 9-55	25 Рыси	7 <sup>m</sup> , K0, оранж.	$\theta_s = 28,9^\circ$ , $\varphi_s = 144,1^\circ$	72,5°	1 (4,5)	BCA-304
25.09.15 г. 15-27	18 Цефея	7 <sup>m</sup> , M2, крас.	$\theta_s = 20,0^\circ$ , $\varphi_s = 237,1^\circ$	113°	0,93 (4,66)	BCA-304
1.10.15 г. 14-37	HR-5184	7 <sup>m</sup> , K0, оранж.	$\theta_s = 23,2^\circ$ , $\varphi_s = 224,4^\circ$	81,7°	0,91 (4,68)	BCA-304, RT-1000DC
1.10.15 г. 14-40	SAO 002460	8 <sup>m</sup> , K0, оранж.	$\theta_s = 22,9^\circ$ , $\varphi_s = 225,2^\circ$	90,7°	0,91 (4,68)	BCA-304, RT-1000DC
1.10.15 г. 14-53	SAO 002558	8,4 <sup>m</sup> , G5, желтая	$\theta_s = 21,6^\circ$ , $\varphi_s = 228,4^\circ$	86°	0,88 (4,7)	RT-1000DC
1.10.15 г. 15-26	SAO 006363	8 <sup>m</sup> , K2, желтая	$\theta_s = 17,8^\circ$ , $\varphi_s = 236,1^\circ$	89,1°	0,92 (4,68)	BCA-304, RT-1000DC
1.10.15 г. 15-40	SAO 009426	8,3 <sup>m</sup> , F5, желтая	$\theta_s = 16,0^\circ$ , $\varphi_s = 239,3^\circ$	95,4°	0,79 (4,84)	BCA-304, RT-1000DC
14.10.15 г. 11-27	HR-5184	7 <sup>m</sup> , K0, оранж.	$\theta_s = 26,9^\circ$ , $\varphi_s = 172,8^\circ$	86,1°	0,94 (4,65)	BCA-304, RT-1000DC
14.10.15 г. 11-37	25 Рыси	7 <sup>m</sup> , K0, оранж.	$\theta_s = 27,0^\circ$ , $\varphi_s = 175,6^\circ$	89,3°	1,2 (4,38)	BCA-304, RT-1000DC
14.10.15 г. 11-50	HR-4953	7,3 <sup>m</sup> , K0, оранж	$\theta_s = 27,1^\circ$ , $\varphi_s = 179,2^\circ$	70,0°	1,1 (4,5)	BCA-304, RT-1000DC
14.10.15 г. 11-59	SAO 028818	8 <sup>m</sup> , K5, оранж	$\theta_s = 27,1^\circ$ , $\varphi_s = 181,7^\circ$	60,7°	1,1 (4,5)	BCA-304, RT-1000DC
14.10.15 г. 13-27	HR-5180	7,1 <sup>m</sup> , K0, оранж.	$\theta_s = 24,0^\circ$ , $\varphi_s = 205,6^\circ$	47,0°	2,19 (3,7)	BCA-304, RT-1000DC
14.10.15 г. 13-49	28 Большой Медведиц	7,1 <sup>m</sup> , F2, оранж.	$\theta_s = 22,5^\circ$ , $\varphi_s = 211,3^\circ$	81,8°	0,95 (4,64)	BCA-304
14.10.15 г. 13-57	SAO 043732	8 <sup>m</sup> , K5, оранж	$\theta_s = 21,9^\circ$ , $\varphi_s = 213,4^\circ$	61,7°	1,21 (4,39)	BCA-304, RT-1000DC
14.10.15 г. 14-29	SAO 002558	8,4 <sup>m</sup> , G5, желтая	$\theta_s = 19,1^\circ$ , $\varphi_s = 221,3^\circ$	89,7°	0,83 (4,75)	BCA-304, RT-1000DC
14.10.15 г. 15-34	Мю-2 Волопаса	7 <sup>m</sup> , K0 оранж.	$\theta_s = 12,1^\circ$ , $\varphi_s = 236,3^\circ$	54,4°	1,21 (4,34)	BCA-304, RT-1000DC

Примечание:  $\theta_s$ ,  $\varphi_s$  – высота и азимут Солнца.

Интегральная яркость неба изменялась в диапазоне от 0,8 до 2,2 Вт/м<sup>2</sup>·ср (от 4,8 до 3,7 зв. вел./угл.с<sup>2</sup>). Время накопления сигнала (время экспозиции) на видеокамере RT-1000DC изменялось в интервале от 55 до 120 мс, на видеокамере ВСА-304 оно было постоянным и составляло 40 мс.

Проведена съемка в общей сложности 18-ти звезд яркостью от 7<sup>m</sup> до 8,4<sup>m</sup>. Время, которое затрачивали операторы на поиск и обнаружение слабого изображения звезды в поле видеоснимка, составляло от 3 до 30 с. Чтобы уменьшить вероятность ошибки в отождествлении звезды, выбирались две близкорасположенные звезды (по программе StarCalc), на которые затем направлялось поле зрения видеокамер. В таблице приведены данные только для самой слабосветящейся звезды из регистрируемой пары.

На рис. 3 приведены снимки пар звезд яркостью 5,5<sup>m</sup> и 7<sup>m</sup> с угловым расстоянием между ними 10 угловых минут соответственно. Снимки с видеокамеры ВСА-304 приведены без каких либо дополнительных обработок кроме тех, которые заложены в видеокамере. Снимки с видеокамеры RT-1000DC представлены после вычитания фонового кадра, которое осуществлялось в программе ImageJ. Более яркую звезду 5,5<sup>m</sup> оператор воспринимал, несомненно, лучше чем менее яркую 7<sup>m</sup>. Обработка снимка показала, что отношение интегралов в пятнах изображений звезд, хорошо согласуется с отношением яркостей в звездных величинах, указанных в программе Star Calc. На рис. 4 приведен снимок еще менее ярких звезд с блеском 6,6<sup>m</sup> и 8,4<sup>m</sup> и угловым расстоянием между ними 0,5 угловых минут. Видно, что регистрация проходит вблизи шумов. Интегральный сигнал в пятне яркой звезды больше, чем в пятне менее яркой в 1,7 раза, а из соотношений звездных блесков должен быть в 5 раз больше. Такое несоответствие вероятно связано с большой погрешностью обработки изображения, возникающей из-за больших шумов регистрации. В проведенных регистрациях звезд малой яркости отношение сигнал-шум было невелико и составляло около 2,5–8. При определении шумов учитывались как временной, так и пространственный шум [11].

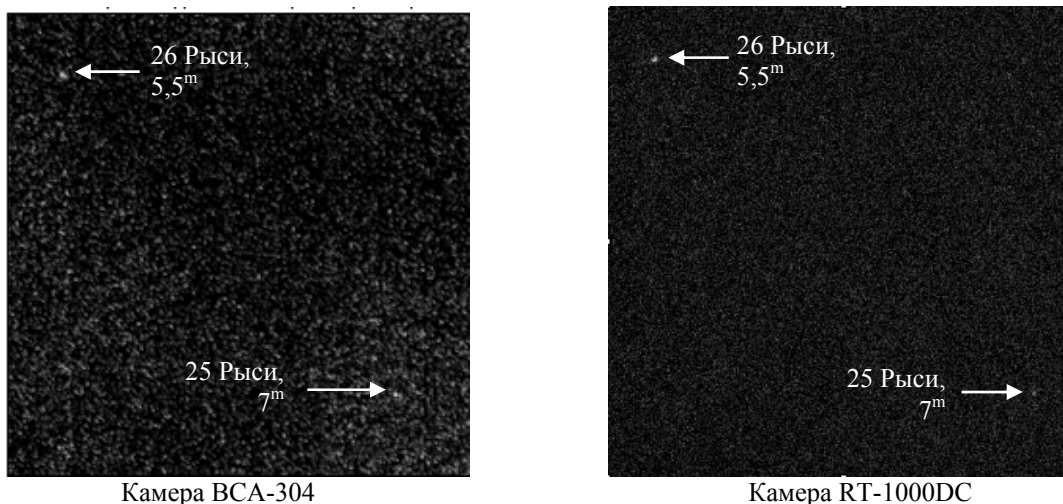
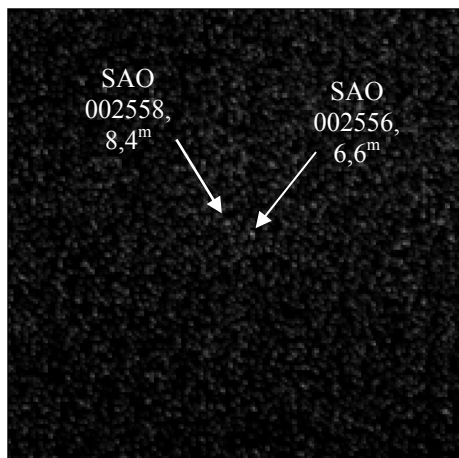
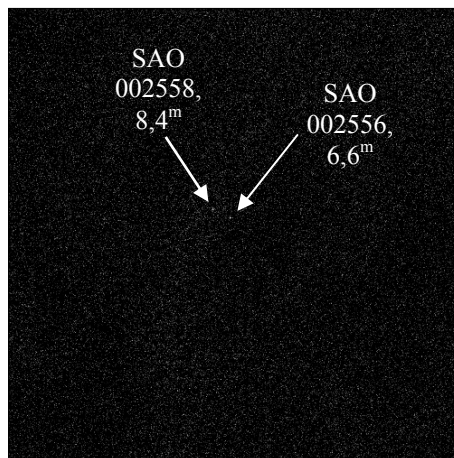


Рис. 3. Снимки звезд 26 Рыси с блеском 5,5<sup>m</sup> и 25 Рыси с блеском 7<sup>m</sup>. Время съемки 11-37 ч от 14.10.15 г. Расстояние между звездами 10 угл. мин. Угловой размер изображения 11x11 угл. мин

На рис. 5 приведена зависимость блеска предельно наблюдаемой звезды от яркости фона неба, выраженной в звездных величинах на квадратную угловую секунду. Точками отмечены полученные результаты наблюдения, а сплошной линией – расчет. Расчетные оценки делались для видеокамеры RT-1000DC в паре со своим телескопом и при отношении сигнал-шум равным трем. Такая величина отношения сигнал-шум была определена в работе [13], как предельная, при которой изображение одиночной звезды еще может наблюдаться оператором. Как видно из рисунка, наблюдаемая яркость звезды в дневных условиях значительно зависит от свечения фона дневного неба и может изменяться в соответствии с расчетной кривой от 4,5 до 9 звездной величины при изменении яркости свечения фона неба от 1,5 до 6 зв. вел./угл.с<sup>2</sup>.



Камера BSA-304



Камера RT-1000DC

Рис. 4. Снимки звезд SAO 002556 с блеском 6,6<sup>м</sup> и SAO 002558 с блеском 8,4<sup>м</sup>. Время съемки 14-29 ч от 14.10.15 г. Расстояние между звездами 30 угл. с. Угловой размер изображения 10x10 угл. мин

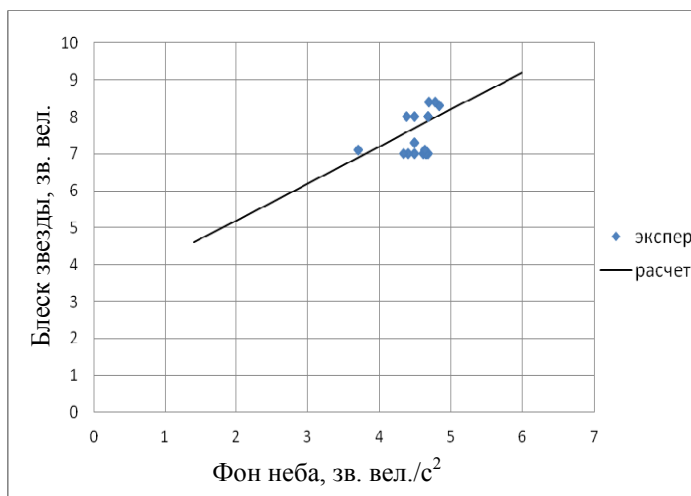


Рис. 5. Зависимость блеска предельно наблюдаемой звезды от яркости фона неба в звездных величинах на квадратную угловую секунду

## Заключение

Проведенные испытания кремниевых видеокамер, фотоприемные матрицы которых обладают большой зарядовой емкостью пикселя, позволили при дневной визуализации звезд увеличить время экспозиции и отодвинуть границу порога насыщения вызванного сильной засветкой дневного неба. Проведенными исследованиями показано, что:

– применение видеокамер RT-1000DC и BSA-304, при разработке которых были учтены наши пожелания, показывает лучшие результаты по сравнению с применявшимися ранее видеокамерами HXG-40NIR и Wat-100N;

– лучшие технические свойства выбранных видеокамер позволили увеличить проникающую способность регистрации до 7-8 звездной величины при яркости фона дневного неба 4-5 зв. вел./угл.с<sup>2</sup>;

– при повышении яркости свечения неба доступными для наблюдения могут быть только более яркие звезды. Так с увеличением яркости неба от 6 до 1,5 зв. вел./угл.с<sup>2</sup> будут наблюдаться звезды соответственно от 9 до 4,5 звездной величины при регистрации испытанной видеокамерой RT-1000DC.

## Список литературы

1. Масевич А. Г. Сб. научных трудов. Проблема загрязнения космоса (космический мусор) // – М.: Космосинформ, 1993.
2. Масевич А. Г. Столкновения в околоземном космическом пространстве (космический мусор) // Сб. научных трудов. – М.: Космосинформ, 1995.
3. Чеботарев А. Осторожно, в космосе мусор // Военный парад, сентябрь-октябрь 1996. С. 139.
4. Свиридов К. Н., Белкин Н. Д. Наземная космическая система для контроля космического мусора // Конверсия в машиностроении. 1997, № 3. С. 36.
5. Авзалов И. З., Бажанов Ю. В., Бакут П. А., Березенцев М. Ю., Карпов А. Н., Малышева З. М., Шаргородский В. Д., Шумилов Ю. П. Оптико-электронная система для дневного наблюдения космических объектов на фоне звезд // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14, № 12.
6. Бондарь С. Ф., Выгон В. Г., Маланин А. В., Шилин В. Д. Оценка возможности наблюдений ИСЗ пассивными оптическими средствами в сумеречных и дневных условиях // Оптический журнал. 1994, № 3. С. 70–76.
7. Chesser D., Vunck D., Born T., Axelson W., Rehder K., Medrano R. Камера работающая в ближней инфракрасной области для улучшения возможности дневной визуализации // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5082. P. 1–12.
8. Roggemann M. C., Douglas D., Therkildsen E. и др. Модернизация и исследования дневной визуализации применительно к космической ситуационной осведомленности // АМОС 2010, Мауи, Гавай, США, 14–17 сентября 2010. С. 172–184.
9. Гришин Е. А., Мелков С. Н., Миловидов В. Л. Инфракрасная камера на основе барьеров Шоттки для дневных наблюдений звезд // Приборы и техника эксперимента. 2003, № 2. С. 83–86.
10. Новиков С. Б., Овчинников А. А. Предельные возможности получения наземными телескопами изображений астрономических объектов с высоким угловым разрешением // Сб. статей. Атмосферная нестабильность и адаптивный телескоп, Ленинград, Изд-во «Наука», 1988.
11. Евтихеев Н. Н., Краснов В. В., Родин В. Г., Солякин И., Стариков С. Н., Черёмхин П. А., Шапкарина Е. А. Увеличение отношения сигнал-шум за счет пространственного усреднения при регистрации изображений // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. 2012, № 4. С. 122–136.
12. Брондз Д. С., Харитоновна Е. Н. Коррекция геометрического шума МФПУ с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов передаточных характеристик матрицы полиномом Т-го порядка [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроника. 2008, № 11. С. 29.
13. Сюндюков А. Ю., Зыков Л. И., Лебедев В. А. и др. Оценка проникающей способности визуализации звезд на фоне дневного неба переменной яркости // Сборник докладов IX-ой Всероссийской школы студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, стр. 197–203, г. Саров, 2015.
14. Техническое описание видеокамеры Wat-100N. ООО Солинг, www.soling.ru, 2008.
15. Цифровая камера RT-1000DC. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ООО Растр Технолоджи, 2014.
16. Видеокамера с переменной частотой суммирования. ЗАО НПК Видеоскан, 2014.
17. Цифровая камера HXG-40NIR. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Фирма Baumer Optronic, 2012.
18. Rork W., Lin S. S., Yakutis A. J. Наземная оптико-электронная система обнаружения в дневное время искусственных спутников в отраженном солнечном свете // Project report ETS-63, Массачусетский институт технологии, Лаборатория Линкольна, 25 Мая 1982.