

## Исследование фотометрических характеристик изображений звёзд в реальных условиях эксплуатации звёздных датчиков

Г. А. Аванесов, А. Н. Василейская, А. В. Никитин, О. В. Филиппова, Б. А. Юматов

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

*E-mail: philippova.ov@gmail.com*

В 2016 г. на борту КА «Ресурс-П» № 3 был проведён уникальный эксперимент по исследованию работы звёздных датчиков ориентации в реальных условиях эксплуатации. С борта КА на наземные пункты приёма передавались вычисляемые приборами «внутренние» данные — координаты звёзд на фотоприёмной матрице и сопутствующая информация. Штатная работа приборов при этом не прерывалась. В результате обработки переданной информации бортовыми алгоритмами прибора и сбора комплексной статистики по распознанным звёздам были детально изучены его измерительные свойства. Исследование ближайших окрестностей распознанных звёзд позволило оценить вклад звёзд окружения в полезный сигнал основных звёзд как с точки зрения предельных допустимых звёздных величин, так и по критичным расстояниям до них. Анализ собранной статистики по звёздам выявил типичные для приборов ошибки измерения их координат и позволил выработать меры по их устранению в будущем. По полученной информации об интегральной яркости звёзд удалось понять, как видение прибора соотносится с их различными спектральными характеристиками по информации разных астрономических каталогов. Подтвердилась выявленная на начальном этапе работы возможность и необходимость адаптации данных о звёздах из астрономических звёздных каталогов при составлении бортового каталога прибора с учётом его параметров.

**Ключевые слова:** прибор звёздной ориентации, космический эксперимент, натурные испытания, бортовой каталог звёзд, интегральная яркость звезды, систематическая ошибка, случайная ошибка

Одобрена к печати: 18.11.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-116-126

Объектом исследования стали четыре звёздных датчика ориентации БОКЗ-М60 (блок определения координат звёзд), разработанные и изготовленные в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН), установленные на космическом аппарате (КА) «Ресурс-П» № 3. КА «Ресурс-П» № 3 — аппарат дистанционного зондирования Земли из космоса. Период обращения КА вокруг Земли составляет около 5600 с. Аппарат был выведен на орбиту 13 марта 2016 г. Круговая солнечно-синхронная орбита аппарата высотой 475 км (Ахметов и др., 2017; Кирилин и др., 2016) обеспечивает, в том числе и для приборов звёздной ориентации, идеальные условия с постоянным углом засветки от Солнца, а значит, и с фоновой засветкой на матрице, на протяжении всего орбитального полёта КА.

Приборы БОКЗ-М60 установлены в верхней части корпуса аппарата попарно. Углы между визирными осями приборов в парах (№ 31 и 32, № 30 и 33) составляют около 43°. Плоскости, образованные визирными осями парных приборов, взаимно перпендикулярны.

Модель звёздного датчика БОКЗ-М60 оснащена объективом с фокусным расстоянием 60 мм и относительным отверстием 1:2. В качестве фотоприёмного устройства в приборах используется ПЗС-матрица (прибор с зарядовой связью) «Лев-3» форматом 512×512 пикселей с линейным размером пикселя 16×16 мкм. Угловое поле зрения прибора по стороне матрицы составляет 8°, по диагонали — 11,3°, угловой размер пикселя — 55". Работа приборов синхронизирована внешней секундной меткой, привязанной к бортовому времени с точностью 100 мкс.

Экспериментальные данные формировались всеми приборами БОКЗ-М60 на фоне их штатной работы в составе системы управления движением КА. Информация с приборов поступала в запоминающее устройство и передавалась на наземные пункты приёма во время сеансов связи.

Сбор данных осуществлялся в период с 21 сентября 2016 г. по 12 февраля 2017 г. Частота работы прибора БОКЗ-М60 составляет 1 Гц. Таким образом, за время эксперимента с четырёх приборов на Землю была передана информация приблизительно с  $5,2 \cdot 10^7$  кадров (Аванесов и др., 2018б).

На рис. 1 схематически показана карта покрытия небесной сферы кадрами, полученными четырьмя приборами за время эксперимента.

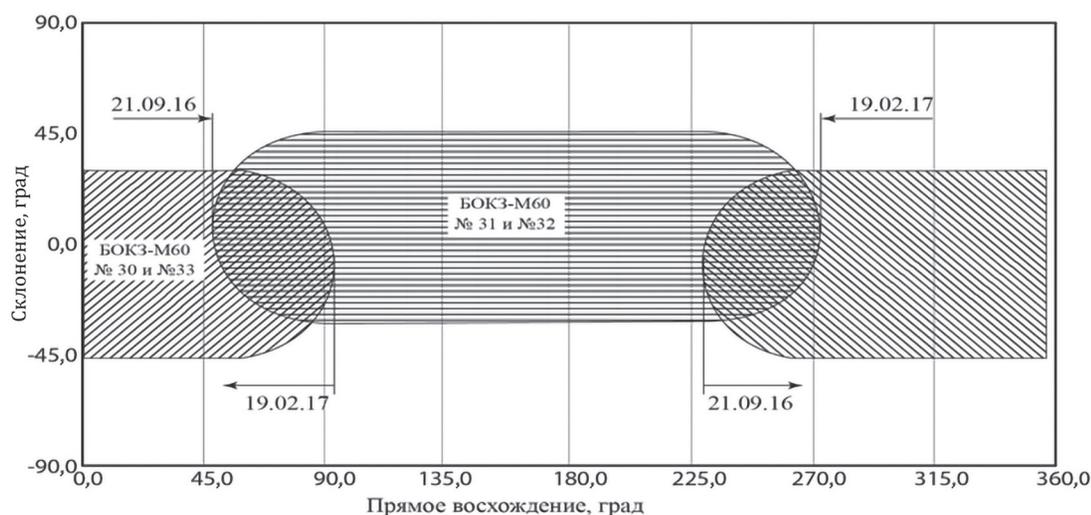


Рис. 1. Карта покрытия небесной сферы кадрами с четырёх приборов БОКЗ-М60 на КА «Ресурс-П» № 3 за время эксперимента

Бортовой каталог приборов БОКЗ-М60 на КА «Ресурс-П» № 3 был составлен на основе каталога SAO (англ. Smithsonian Astrophysical Observatory). В него вошли 8713 звёзд до 7<sup>m</sup> звёздной величины. Отбор звёзд в бортовой каталог осуществляется с целью обеспечения наличия как минимум четырёх звёзд при произвольном положении кругового поля зрения прибора на небесной сфере. Осуществляется сканирование данных астрономических каталогов круговым полем зрения прибора, при котором выбираются самые яркие звёзды по звёздной величине без учёта их спектральных классов.

В статье приводятся результаты обработки всех полученных в результате эксперимента данных с точки зрения восприятия прибором БОКЗ-М60 звёзд бортового каталога.

Наземная обработка телеметрических кадров включала предварительный отбор кадров, полученных при орбитальном движении КА, в отсутствие маневрирования, а именно при движении с угловой скоростью, не превышающей 4 угл. мин/с, и угловом ускорении не более 4 угл. мин/с<sup>2</sup>, а также проведение геометрической калибровки с вычислением параметров обобщённой дисторсии для каждого прибора (Аванесов и др., 2018а).

Непосредственный сбор информации о звёздах осуществлялся после прогона отобранных кадров через алгоритм, повторяющий штатный алгоритм распознавания звёзд по бортовому каталогу прибора БОКЗ-М60 без априорной информации, в режиме так называемой начальной ориентации. С целью распознавания как можно большего числа звёзд на кадре также было увеличено максимальное допустимое остаточное рассогласование для координат звёзд.

Все сведения о распознанных звёздах собраны в базу данных, которая может по номеру звезды, радиусу поля зрения, номеру прибора и интересующему временному промежутку наблюдения выдать следующую информацию о ней:

- среднюю интегральную яркость ( $Br$ );
- среднеквадратическое отклонение (СКО) интегральной яркости звезды ( $Br_{sd}$ );
- среднее количество пикселей в изображении звезды ( $Nel$ );
- СКО количества пикселей в звезде ( $Nel_{sd}$ );
- средние остаточные рассогласования по прямому восхождению и склонению ( $dAl$ ,  $dDt$ );

- СКО остаточных рассогласований по прямому восхождению и склонению ( $dA/S_d, dDt_{S_d}$ );
- систематическую и случайную ошибки определения координат звезды ( $L, S$ ).

Остаточные рассогласования звезды включают в себя широчайший спектр ошибок, которые возникают при любой попытке сфотографировать источник света и определить его координаты. Во-первых, речь идёт о визуализации бесконечно удалённого точечного источника света на дискретной структуре с ограниченным и дискретным динамическим диапазоном, что неминуемо приводит к наличию методической ошибки и зависимости от функции рассеяния точки объектива. Методическая ошибка — это величина несоответствия между энергетическим центром источника и геометрическим центром изображения, возникающая при попадании центра звезды в произвольную точку пикселя матрицы и при его неравномерной чувствительности. Как правило, эта ошибка независима для двух перпендикулярных направлений по сторонам пикселя и достигает своего максимума в точках 1/4 и 3/4 долей стороны пикселя. Величина этой ошибки может достигать до десятой части углового размера пикселя, что в пересчёте для прибора БОКЗ-М60 составляет примерно 5,5". Разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и ввод порога отсечки для локализации звездоподобного объекта приводят к тому, что интегральная яркость звезды не соответствует действительной её яркости в относительном выражении. Так, звёзды со звёздной величиной менее 4m содержат как минимум один пиксель с превышением динамического диапазона яркости. Спектральные особенности звёзд и естественное ограничение пропускания объектива и матричного приёмника приводят к непропорциональному вкладу в интегральную яркость звезды для одинаковой звёздной величины, но разных спектральных классов. Наличие звёзд окружения в ближайшей окрестности каталожных звёзд также вносит вклад в сигнал пикселей, приписываемых прибором к той или иной звезде (Аванесов и др., 2018а, б, д) согласно используемому алгоритму локализации звездоподобного объекта. Это сказывается на распределении полезного сигнала звезды по пикселям и влияет на вычисляемые координаты звезды методом средневзвешенного.

Вдобавок ко всем перечисленным ошибкам, накапливаемым при локализации и определении центра звёзд, в их остаточных рассогласованиях скрывается ошибка, возникающая при распознавании произвольной конфигурации звёзд на кадре. Для определения параметров ориентации минимизируется суммарное отклонение взаимных угловых расстояний между вычисленными координатами звёзд и их проекциями по данным бортового каталога по методу наименьших квадратов. Таким образом, ошибки определения реальных положений звёзд суммируются и распределяются между всеми звёздами, участвующими в определении ориентации. Увеличение количества звёзд может помочь уменьшить суммарную ошибку. В среднем прибором локализуется 15–20 объектов, при этом распознаётся от 4 (на самых редконаселённых участках небесной сферы) до 12 звёзд. Количество звёзд ограничено чувствительностью прибора, «заселённостью» небесной сферы подходящими звёздами, а также памятью и временем обработки массивов звёзд бортового каталога.

Ввиду наличия такого большого объёма «случайных» факторов, влияющих на измеряемые параметры одной звезды, само по себе единичное измерение вряд ли содержит в себе много полезной информации. Для повышения достоверности статистики и возможности делать какие-то выводы о характеристиках звёзд предполагается, что звезда должна быть распознана не менее 50 раз за всё время наблюдения.

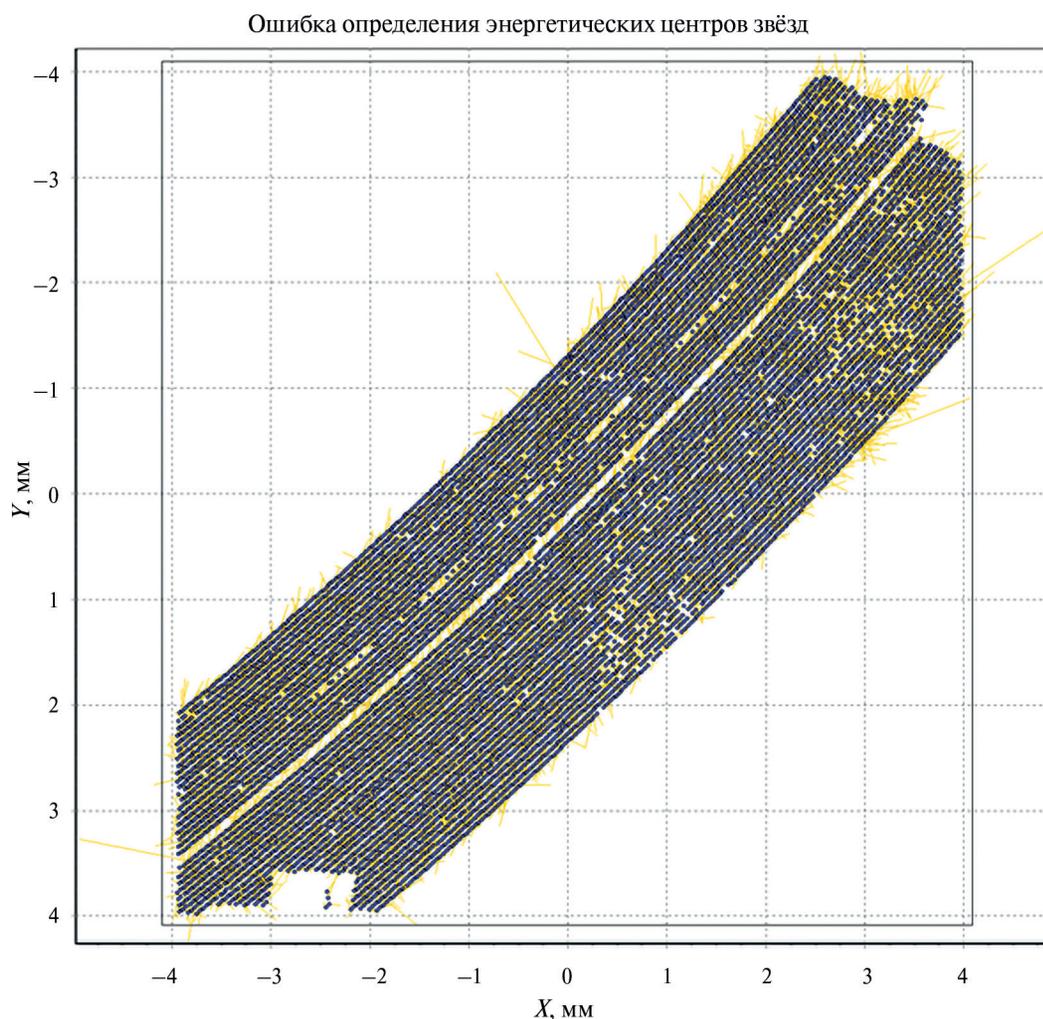
Ошибки  $L$  и  $S$  — это угловые расстояния. При этом  $L$  соответствует удалённости среднего измеренного положения звезды от каталожного значения. При статистически достоверном количестве наблюдений звезды в этой ошибке не остаётся случайных составляющих от методической ошибки и изменения вклада шумов при локализации. А при равномерной и плотной заселённости центрального поля зрения звездой на выборке кадров под разными азимутальными углами эта составляющая не будет зависеть от конфигурации звёзд, участвующей в распознавании. Таким образом, в систематической ошибке проявляются особенности визуального восприятия конкретного прибора, сказывающиеся на влиянии ближайшего окружения звезды на её измеренные координаты.

Ошибка  $S$  — среднеквадратичное отклонение положения звезды от кадра к кадру, характеризует величину облака разброса каждого измеренного положения звезды от среднего измеренного. То есть отражает ошибку измерения, связанную с единичным положением центра звезды внутри пикселя матрицы и конфигурацией шумов любой природы на момент получения кадра, фактически со случайным стечением обстоятельств. Отсюда и название обеих ошибок — систематическая ( $L$ ) и случайная ( $S$ ) соответственно.

Ещё одним ограничением для отбора информации о звезде стало то, что диафрагма светозащитной бленды прибора БОКЗ-М60 виньетировывает объектив до кругового поля зрения диаметром  $5^\circ$ . Это приводит к тому, что освещённость в углах матрицы составляет всего лишь 60 % от освещённости центральных пикселей при равномерной засветке поля зрения прибора. При этом на краю центральной круговой области радиусом  $2^\circ$  освещённость уменьшается не более чем на 3 % в соответствии со спецификацией объектива. Что подтверждается и при анализе данных случайно выбранных звёзд.

Для демонстрации приведён анализ интегральной яркости звезды SAO № 150304, распознанной 31 прибором в период с 15 по 18 октября 2016 г. По каталогу SAO это звезда спектрального класса K0 и звёздной величины 5,7m. Класс K — наиболее часто встречающийся спектральный класс среди звёзд бортового каталога прибора и лучше всего поддающийся геометрической калибровке на приборах БОКЗ-М60.

На *рис. 2* показаны местоположения звезды на матрице на всех кадрах, где она была распознана, — синие точки.



*Рис. 2.* Местоположение звезды SAO № 150304 на кадрах по экспериментальным данным прибора № 31 в период с 15 по 18 октября 2016 г.

Рассмотрим центральный проход звезды через всю диагональ матрицы и сравним средние интегральные яркости звезды в разных центрированных и круговых полях зрения.

На центральном проходе звезда была распознана 248 раз. В *табл. 1* приведено количество распознаваний в соответствующих кольцах поля зрения и средние интегральные яркости в них, а также процент от максимального значения в кольце поля зрения радиусом от 1 до 2°.

Таблица 1

	$r \leq 1^\circ$	$1 < r \leq 2^\circ$	$2 < r \leq 3^\circ$	$3 < r \leq 4^\circ$	$4 < r \leq 5^\circ$
Количество распознаваний	43	50	50	49	56
Средняя интегральная яркость, градаций АЦП	3982,23	3997,24	3883,84	3618,63	3107,25
Процент от максимума	99,6	100	97,2	90,5	77,7

Из *табл. 1* видно, что наиболее достоверная статистика для звезды с точки зрения её интегральной яркости и размера её изображения в пикселях матрицы будет по выборке локализованных объектов в центре кадра радиусом до 2° поля зрения. В этой области ещё не сказывается виньетирование бленды и оптические свойства объектива близки к идеальной тонкой линзе.

Сравнение статистики из центральной области кадра для одних и тех же звёзд, полученной разными приборами (Аванесов и др., 2018в), показывает:

- приборы различаются остротой фокусировки, это прослеживается по различию среднего количества пикселей в звезде;
- средняя интегральная яркость звёзд в большинстве случаев одинакова для разных приборов.

К сожалению, в ходе эксперимента не была предусмотрена возможность передачи внутренних вспомогательных вычисляемых параметров, использующихся при локализации, — порога отсечки и средних значений сигнала в фоновых пикселях. Но, как следует из второго вывода по результатам сравнения, в среднем от звезды в качестве полезного сигнала разными приборами регистрируется одинаковая часть её истинного потока излучения.

Таким образом, для выявления общих закономерностей и классификации звёзд можно объединить данные со всех приборов по одной звезде. Особый случай «скачущих» звёзд (Аванесов и др., 2018б, г) требует отдельного рассмотрения. Но, как правило, в этом случае речь идёт о больших значениях как систематической, так и случайной ошибок звезды, что само по себе требует тщательного и индивидуального подхода.

За всё время эксперимента четырьмя приборами БОКЗ-М60 было распознано 7319 звёзд. При этом в центре поля зрения и на более чем 50 кадрах приборами было распознано 6036 звёзд, что составляет 69 % от бортового каталога.

В *табл. 2* приведено распределение звёзд по количеству распознаваний.

Таблица 2

Количество распознаваний	Количество звёзд
50–100	240
100–1000	790
1000–5000	679
5000–10 000	2345
10 000–50 000	1927
50 000–70 052	55

Максимальные значения систематической и случайной ошибок среди всех распознанных звёзд равны 77 и 33" соответственно. СКО интегральной яркости достигает 96 % от средней интегральной яркости для самой «непостоянной» звезды. Обработка всех данных эксперимента позволила оценить точнее пределы допустимых ошибок для звёзд, а также критические радиусы окрестностей для основных звёзд, наличие соседей в которых влияет на точность определения их координат.

Если ранее осуществлялась выборка «подходящих» кадров для каждой звезды, то теперь из 6036 звёзд производится уже непосредственная отбраковка самих звёзд по величине средних ошибок по следующим ограничениям в приведённой последовательности.

1.  $L > 3''$ . Это приводит к отсеиванию из общего массива 1007 звёзд.

Благодаря этому условию отбираются звёзды, в ближайшей окрестности которых отсутствуют соседи. Либо центр звезды окружения практически совпадает с базовой звездой, что не может повлиять на точность определения её координат. Исследование окружения отобранных звёзд как раз даёт представление о радиусе критичной окружности «присоединения» для прибора и звёздной величине звёзд-соседей, которая способна повлиять на центр базовой звезды.

2.  $S > 5''$ . Это приводит к отсеиванию из общего массива 612 звёзд.

Ограничение сверху на случайную ошибку звезды отсеивает «скачущие» звёзды (Аванесов и др., 2018г) — самый сложный вариант как для прогнозирования, так и для моделирования. Успешно побороться с такими случаями можно только на более раннем этапе локализации при определении порога отсечки. При самом пессимистичном прогнозе может помочь исключение этой звезды из бортового каталога. Все вышеперечисленные причины приводят и к ограничению разброса интегральной яркости одной и той же звезды.

3.  $Br_{sd} > 0,1Br$ . Отсеяна 761 звезда.

4. Звёзды, не кросс-идентифицированные в каталоге Gaia (DR2). Это условие приводит к отсеиванию ещё 300 звёзд.

Четвёртый пункт — последний, но не менее важный критерий отбора. Наличие звезды в астрометрическом каталоге Gaia необходимо, поскольку информацию о наличии звёзд-соседей и их спектральных характеристиках можно взять только из этого каталога. Каталог постоянно пополняется, и со временем это ограничение исчезнет, тем не менее пока каталог Gaia неполон с точки зрения наиболее ярких звёзд (до 4m). Проблема использования информации о звёздах из разных каталогов влияет на оценку вклада интегральной яркости звёзд окружения в сигнал «базовой» звезды, учитывая, что даже в пределах одного каталога Hipparcos и тем более SAO яркости звёзд не соответствуют их звёздным величинам.

В результате остаётся 3356 звёзд бортового каталога прибора, что не так уж мало. Учитывая все строгие ограничения, которые были применены к этим звёздам, они составляют вполне надёжный и крепкий базис для исследования и понимания критичных особенностей звёзд, использующихся в бортовых каталогах приборов звёздной ориентации. Опираясь на данные этих хорошо зарекомендовавших себя звёзд и их статистику, можно оценить вклад ошибок определения координат звёзд в точность определения параметров ориентации в различной их конфигурации, включая отбракованные при сборе статистики. Вновь полученные знания применяются также для разбора особенностей отбракованных звёзд и выявления путей их «улучшения» с точки зрения прибора в целях повышения качества бортового каталога.

На примере этих звёзд рассмотрим, как фотометрические данные о звёздах в разных каталогах коррелируют с их восприятием прибором. Бортовой каталог последних версий прибора БОКЗ-М60 формируется на основе каталога Hipparcos. Поэтому если далее будут приводиться данные о звезде без специального указания, они будут взяты из каталога Hipparcos. В нём, так же как и в каталоге SAO, присутствует информация о спектральном классе звёзд.

На *рис. 3* (см. с. 122) приведена диаграмма распределения этих звёзд по звёздной величине и интегральной яркости с разбивкой по спектральным классам. На *рис. 4* (см. с. 122) показан увеличенный фрагмент графика *рис. 3*, на котором находятся 84 % звёзд обработки (2979 звёзд). Из графика на *рис. 4* видно, что интегральная яркость звёзд даже одного спектрального класса и одной звёздной величины лежит в широких пределах.

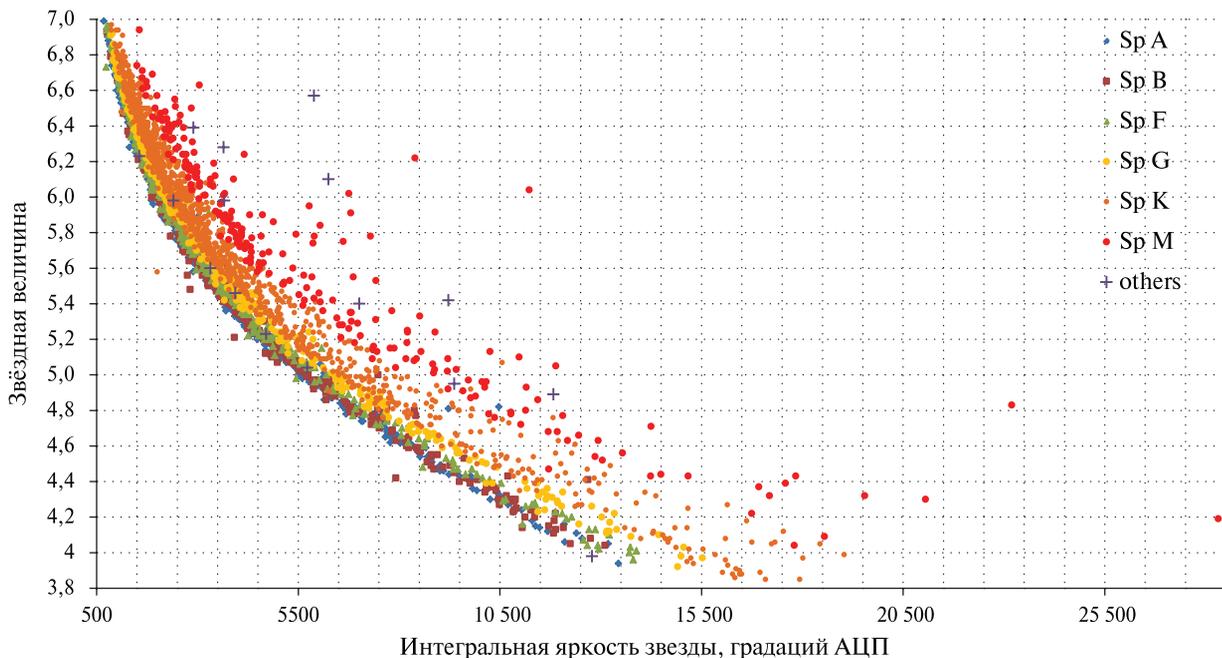


Рис. 3. Диаграмма распределения звёзд выборки по звёздной величине и интегральной яркости с указанием их спектральных классов по каталогу Hipparcos

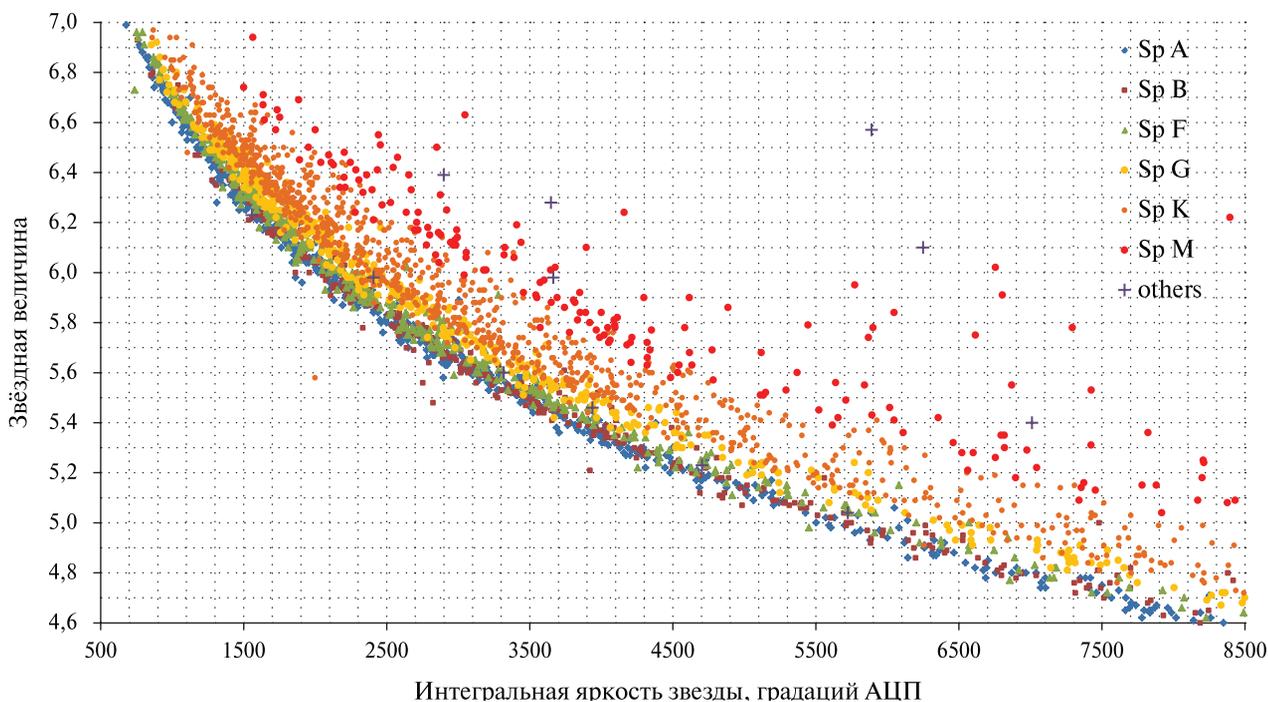


Рис. 4. Увеличенный фрагмент диаграммы распределения звёзд по звёздной величине и их интегральной яркости, охватывающий 84 % звёзд обработки

На рис. 5 (см. с. 123) отдельно показана диаграмма для звёзд спектрального класса К как самого многочисленного подмножества, с разбитием на подклассы.

Как видно, для одной и той же звёздной величины звёзд одного спектрального подкласса интегральная яркость звезды может достигать разброса в 1–1,5 тыс. градаций АЦП. Это говорит о несоответствии спектральной информации о звёздах по каталогу Hipparcos фотометрическим характеристикам прибора БОКЗ-М60. На рис. 5 также приведён усреднённый ло-

гарифмический тренд для звёзд спектрального класса К. Звезде 5m, согласно этому тренду, соответствует интегральная яркость 6800 градаций АЦП.

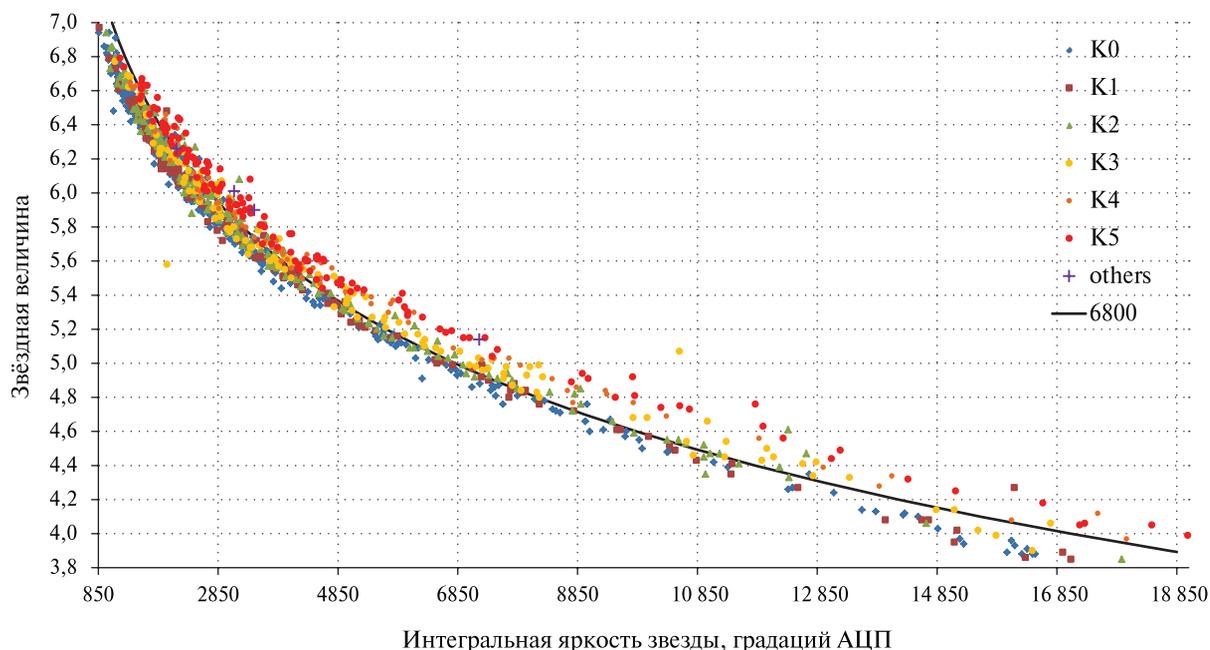


Рис. 5. Диаграмма распределения звёзд спектрального класса К

В табл. 3 приведено общее количество звёзд спектрального класса К в выборке и их количество по подклассам.

Таблица 3

Подклассы	Количество звёзд
К0	391
К1	176
К2	181
К3	139
К4	91
К5	135
Другие	4
Итого	1117

Для звёзд спектрального класса К на рис. 6 показана диаграмма распределения звёздной величины и интегральной яркости этих звёзд с разбивкой уже на интервалы по эффективной температуре из каталога Gaia. Теперь, согласно логарифмическому тренду, звезде 5m по каталогу Gaia соответствует интегральная яркость 4400 градаций АЦП.

На рис. 6 (см. с. 124) видно, что звёзды с интегральной яркостью более 11 тыс. градаций АЦП хуже следуют тренду. Это объясняется насыщением в центральных пикселях звёзд, звёздная величина которых меньше 4m. Причём чем больше интегральная яркость звезды, тем больше она занимает пикселей на матрице. При дальнейшем росте интегральной яркости увеличивается и количество пикселей в насыщении в изображении. Таким образом, растёт доля нерегистрируемого матричным приёмником сигнала в центральных пикселях звезды.

Безусловно, интегральная яркость звезды зависит и от величины порога отсечки. Порог отсечки в данных приборах — технический параметр, который позволяет отделить сигнал

звезды от фона и вклада приборного и фотонного шумов в пикселях, а следовательно, и в полезный сигнал звезды, при этом от размеров изображения звезды он никак не зависит. В результате для звёзд разной звёздной величины доля отсекаемого с шумовой составляющей сигнала различна; например, для звёзд 4–5<sup>m</sup> звёздной величины она составляет 5–10 %, тогда как для звёзд 6–7<sup>m</sup> звёздной величины она может достигать до 30 % (Аванесов и др., 2018в). Значит, для звёздных величин и их интегральных яркостей не будет выполняться логарифмический закон на нижнем краю диапазона чувствительности прибора и при установленной максимальной допустимой интегральной яркости локализованного объекта, что заметно и на приведённых диаграммах.

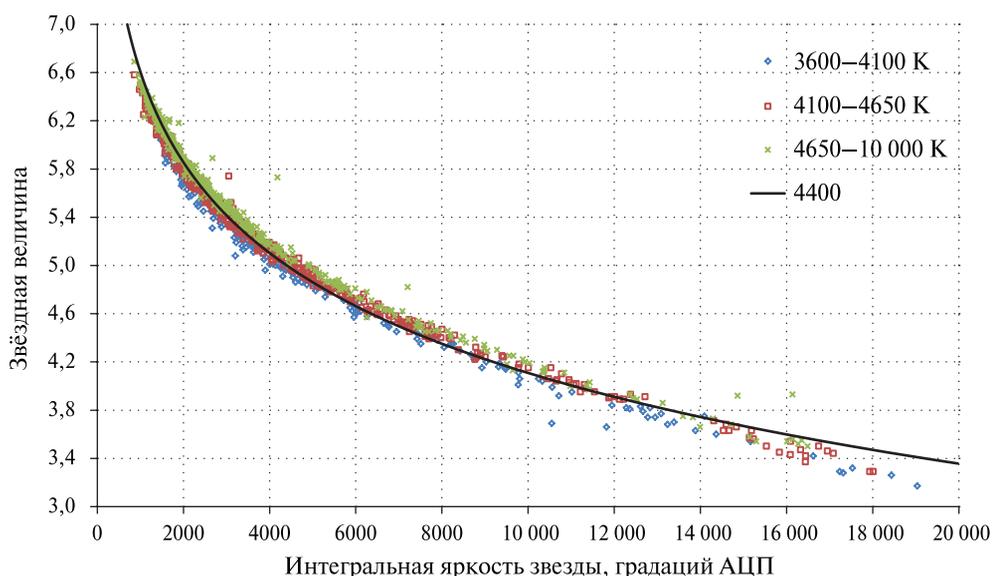


Рис. 6. Диаграмма распределения звёзд спектрального класса К согласно их эффективной температуре и звёздной величине по второму релизу каталога Gaia

Из сравнения диаграмм на рис. 4–6 можно сделать несколько существенных выводов:

- разброс по интегральной яркости для одной и той же звёздной величины по информации каталога Gaia существенно меньше. Это говорит о большей достоверности этой информации с точки зрения спектральных характеристик и видения данного конкретного прибора;
- диапазон звёздных величин в разных каталогах разный как по абсолютному, так и по относительному значению;
- как следствие предыдущего пункта, логарифмический тренд соответствия разный и одной той же звёздной величине в разных каталогах соответствует разная интегральная яркость звезды: для звезды 5<sup>m</sup> в каталоге Hipparcos — 6800 градаций АЦП, в каталоге Gaia — 4400 градаций АЦП.

Вышеизложенный анализ только подтверждает, что ранжирование звёзд для отбора в бортовой каталог должно происходить с учётом восприятия прибора, его фотометрических характеристик, т. е. в зависимости не только от их звёздных величин, указанных в астрономическом каталоге, но и от их спектральных характеристик.

Идентификация нескольких звёзд других спектральных классов по каталогу Hipparcos в каталоге Gaia показывает, что интервалы эффективной температуры пересекаются и что разным спектральным классам звёзд каталога Hipparcos могут соответствовать одинаковые эффективные температуры в каталоге Gaia. Всё это говорит о том, что информация по каталогу Gaia лучше коррелирует с восприятием звёзд прибором БОКЗ-М60.

Отбор наиболее «стабильных» звёзд позволяет их использовать в качестве реперных точек для анализа отбракованных звёзд и понимания путей коррекции информации о них в бор-

товом каталоге с учётом восприятия прибора. «Обратная связь» в качестве анализа отобранных и отбракованных звёзд по их окружению даёт надёжную и исчерпывающую информацию о допустимых границах критичных окрестностей для звёзд каталога и звёздной величине соседей, которые ещё могут оказать влияние на координаты основной звезды, правда, только для конкретной модели прибора.

Отобранные звёзды выступают надёжным подспорьем при верификации модели звёздного датчика и непосредственном моделировании кадров прибора звёздной ориентации, при поиске новых подходов для устранения вклада различного рода ошибок на начальном этапе локализации звезды и даже выборе более совершенного алгоритма локализации.

Накопленные данные позволили по-новому взглянуть на процесс формирования бортового каталога прибора звёздной ориентации, были уточнены старые и сформированы новые критерии отбора звёзд в бортовой каталог.

## Литература

1. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Сметанин П.С. (2018а) Технология наземной обработки данных о координатах звезд в целях повышения точности геопривязки снимков Земли из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 31–38. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-31-38.
2. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Сметанин П.С., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. (2018б) Особенности измерения координат звезд оптико-электронными приборами с различными угловыми разрешениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 39–47. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-39-47.
3. Аванесов Г.А., Куркина А.Н., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. (2018в) Эксперимент по коррекции фрагмента бортового каталога прибора БОКЗ-М60 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 60–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-60-68.
4. Аванесов Г.А., Снеткова Н.И., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. (2018г) Исследование звезд участка небесной сферы двумя датчиками звездной ориентации БОКЗ-М60 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 48–59. DOI: 10.21046/2070-7401-15-6-48-59.
5. Аванесов Г.А., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д. (2018д) Адаптация звездных каталогов к условиям их применения в звездных датчиках ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 69–81. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-69-81.
6. Ахметов Р.Н., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Мятлов Г.Н., Пошехонов В.И., Стратилатов Н.Р. Высокоточная геодезическая привязка изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 1. С. 44–53.
7. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Стратилатов Н.Р., Бакланов А.И., Федеров В.М., Новиков М.В. Космический аппарат «Ресурс-П» // Геоматика. 2010. № 4. Р. 23–26.

## Investigation of photometric characteristics of stellar images in real operating conditions of stellar sensors

G. A. Avanesov, A. N. Vasileiskaya, A. V. Nikitin, O. V. Filippova, B. A. Yumatov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: philippova.ov@gmail.com

In 2016, on board the Resurs-P No. 3 spacecraft, a unique experiment was carried out to study the operation of stellar attitude sensors in real operating conditions. The “internal” data calculated by the instruments — the coordinates of the stars on the photodetector matrix and related information — were transmitted from the spacecraft to the ground receiving stations. At the same time, the regular operation of the instruments was not interrupted. As a result of processing the transmitted information by

the on-board algorithms of the instrument and collecting complex statistics on the recognized stars, its measuring properties were studied in detail. The study of the nearest neighborhoods of recognized stars made it possible to estimate the contribution of the surrounding stars to the useful signal of the main stars, both from the point of view of the maximum permissible magnitudes and the critical distances to them. An analysis of the collected statistics on stars revealed errors typical of instruments in measuring their coordinates and made it possible to develop measures to eliminate them in the future. Based on the information received about the integral brightness of the stars, it was possible to understand how the vision of the device correlates with their different spectral characteristics according to information from different astronomical catalogs. The possibility and necessity of adapting data on stars from astronomical stellar catalogs when compiling the onboard catalog of the instrument, taking into account its parameters, was confirmed.

**Keywords:** star tracker, space experiment, full-scale tests, onboard stars catalog, integrated star brightness, systematic error, random error

Accepted: 18.11.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-116-126

## References

1. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Kurkina A. N., Smetanin P. S. (2018a), Technology for ground processing of data on the stars' coordinates in order to improve the accuracy of georeferencing Earth images from space, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 31–8 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-31-38.
2. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Smetanin P. S., Filippova O. V., Elyashev Ya. D. (2018b), Features of coordinate measuring by opto-electronic star trackers with different angular resolution, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 39–47 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-39-47.
3. Avanesov G. A., Kurkina A. N., Filippova O. V., Elyashev Ya. D. (2018c), An experiment for the correction of the onboard catalogue fragment of the BOKZ-M60 star tracker, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 60–68 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-60-68.
4. Avanesov G. A., Snetkova N. I., Filippova O. V., Elyashev Ya. D. (2018d), Studying the stars of the celestial sphere section by two BOKZ-M60 star trackers, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 48–59 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-48-59.
5. Avanesov G. A., Stroilov N. A., Filippova O. V., Shamis V. A., Elyashev Ya. D. (2018e), Adaptation of star catalogues for their application in star trackers, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 69–81 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-69-81.
6. Akhmetov R. N., Ereemeev V. V., Kuznetsov A. E., Myatov G. N., Poshekhonov V. I., Stratilatov N. R., Organization of High-Precision Geolocation of Earth Surface Images from the Spacecraft “Resurs-P”, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 1, pp. 44–53 (in Russian).
7. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Stratilatov N. R., Baklanov A. I., Fedorov V. M., Novikov M. V., Spacecraft Resurs-P, *Geomatika*, 2010, No. 4, pp. 23–26 (in Russian).