

## Эксперимент по коррекции фрагмента бортового каталога прибора БОКЗ-М60

Г. А. Аванесов, А. Н. Куркина, О. В. Филиппова, Я. Д. Эльяшев

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

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

По вычисленным в работе (Аванесов и др., 2018б) данным в бортовой каталог прибора БОКЗ-М60 внесены поправки в координаты компактно расположенной группы из 25 каталожных звёзд. С использованием уточнённого таким образом каталога проведены расчёты параметров ориентации по серии кадров наблюдения участка небесной сферы, где сосредоточены эти звёзды. Выполнена оценка величин случайной и систематической составляющих погрешности измерения координат звёзд, а также ошибок определения координат главной точки. Внесение поправок в координаты звёзд бортового каталога действительно приводит к значительному уменьшению величин систематических ошибок в измерениях координат звёзд и, соответственно, координат главной точки. Таким образом, подтверждена необходимость приведения бортового каталога в соответствие с наблюдательными возможностями прибора. Однако использование при этом статистического метода в современных условиях вряд ли целесообразно. Появление новейших звёздных каталогов, создаваемых в рамках Европейского проекта Gaia, делает более перспективным прямой пересчёт указанных в нём координат звёзд в координаты звёзд бортового каталога с учётом наблюдательных возможностей используемого прибора.

**Ключевые слова:** звёздный датчик, астрометрия, каталог звёзд, систематическая ошибка, случайная ошибка, фоновое излучение, звёзды окружения, центроидный метод, коррекция каталога, статистический метод

Одобрена к печати: 02.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-60-68

### Введение

В работах (Аванесов и др., 2018а, б) на основе экспериментальных данных показана необходимость приведения бортовых звёздных каталогов в соответствие с наблюдательными возможностями используемых звёздных датчиков ориентации. Для этого нужно внести соответствующие поправки в координаты звёзд бортового каталога. При этом его астрономическая точность не должна быть нарушена. Величины поправок должны быть точно измерены или вычислены.

Измерить необходимые величины поправок можно, используя показания датчика ориентации. Величина систематической ошибки измерения координат звёзд, по сути, и есть искомая величина необходимой поправки. Её можно вычислить на статистической основе, как это показано в работе (Аванесов и др., 2018б).

Вычислить необходимую величину поправок для каталогов большинства ныне используемых приборов можно, располагая высокоточным астрономическим каталогом звёзд до  $12^m$  включительно. Для приборов с более высокой чувствительностью, которые неизбежно появятся в ближайшем будущем, скорее всего, придётся использовать каталоги звёзд до  $15^m$ .

Задача данной работы заключается в том, чтобы на примере полученных в ходе полёта КА результатов регулярных наблюдений группы из 25 звёзд показать возможность измерить величины необходимых поправок в их каталожные координаты и снизить за счёт этого величину систематических ошибок измерений координат звёзд и, соответственно, координат главной точки.

Работа строится на полученных в исследованиях (Аванесов и др., 2018а, б) результатах.

Воспользуемся вычисленными статистическим путём в работе (Аванесов и др., 2018б) данными, характеризующими величины систематических ошибок измерения координат

25 звёзд бортового каталога прибора БОКЗ-М60. Внесём их в качестве поправок в бортовой каталог и повторим заново процедуры статистической обработки всего массива имеющихся в нашем распоряжении данных по двум приборам.

Формат журнальной статьи не позволяет привести весь объём получаемых промежуточных результатов, представляемых в виде таблиц и рисунков. Ограничимся лишь необходимым минимумом.

В *табл. 1* приведены вычисленные по бортовому каталогу и осреднённые по большому числу наблюдений величины ошибок измерений координат звёзд  $dAl$ ,  $dDt$  и  $L$  в угловых секундах. Эти данные внесены в качестве поправок в каталожные значения координат  $Al$  и  $Dt$ . После этого запущен стандартный алгоритм вычисления координат звёзд и координат главной точки по большой серии кадров.

Таблица 1. Исходные данные и результаты коррекции бортового каталога

№ п/п	$N_{SAO}$	Исходные данные по бортовому каталогу			Результаты первой коррекции			Результаты второй коррекции		
		$dAl$ , угл. с	$dDt$ , угл. с	$L$ , угл. с	$dAl$ , угл. с	$dDt$ , угл. с	$L$ , угл. с	$dAl$ , угл. с	$dDt$ , угл. с	$L$ , угл. с
1	41010	-41,119	17,791	33,497	-3,749	1,670	3,080	-0,333	0,143	0,271
2	41109	-2,007	-3,280	3,550	0,100	-0,139	0,154	0,027	-0,033	0,038
3	41076	1,386	2,858	2,998	0,137	-0,028	0,093	0,053	-0,043	0,055
4	40756	-4,096	-0,328	2,867	-0,152	0,017	0,107	-0,037	0,007	0,027
5	40999	1,800	-2,248	2,568	0,002	-0,039	0,039	-0,004	-0,013	0,013
6	40840	1,201	2,319	2,479	-0,105	0,075	0,108	-0,048	0,011	0,037
7	40881	3,033	0,112	2,290	0,207	0,008	0,156	-0,021	0,017	0,023
8	40609	-2,753	-0,569	2,107	-0,096	-0,266	0,275	-0,025	-0,098	0,100
9	41288	2,450	-0,815	1,928	0,086	-0,118	0,133	0,045	-0,041	0,052
10	41134	1,363	1,612	1,909	0,350	-0,031	0,265	0,140	-0,025	0,108
11	41463	0,004	-1,588	1,588	0,392	-0,015	0,277	0,188	0,103	0,168
12	41330	2,074	0,366	1,547	0,409	0,142	0,329	0,184	0,045	0,141
13	40778	1,172	-1,303	1,521	-0,173	-0,013	0,117	-0,102	0,012	0,070
14	41406	-0,311	1,449	1,465	0,274	0,279	0,341	0,149	0,080	0,133
15	40720	-1,375	0,875	1,257	-0,806	0,013	0,529	-0,397	-0,030	0,262
16	40789	-1,549	0,108	1,023	-0,482	-0,057	0,321	-0,205	-0,002	0,135
17	40769	0,502	0,784	0,862	-0,125	0,104	0,137	-0,049	0,020	0,041
18	40801	0,114	-0,842	0,845	-0,586	0,023	0,378	-0,323	0,005	0,208
19	41130	0,958	-0,522	0,839	0,049	-0,094	0,100	0,010	-0,025	0,026
20	40818	0,554	0,734	0,839	0,016	0,091	0,092	-0,045	0,018	0,038
21	41168	0,574	-0,633	0,746	0,054	-0,205	0,208	0,035	-0,045	0,051
22	41239	-0,042	-0,612	0,613	0,447	-0,021	0,330	0,190	0,006	0,140
23	40868	-0,816	0,058	0,611	-0,096	0,008	0,072	-0,053	0,014	0,042
24	40925	0,507	0,170	0,375	0,098	0,038	0,075	-0,003	0,014	0,014
25	59319	-0,202	0,169	0,229	0,290	-0,034	0,225	0,198	0,038	0,156
Средние значения:				2,822			0,318			0,094

Видно, что после первой итерации величины  $dAl$ ,  $dDt$  и  $L$  уменьшились почти в 10 раз.

Процедура коррекции бортового каталога проведена ещё раз. Поправки снова введены в каталожные координаты звёзд. Повторно выполнены процедуры вычисления координат звёзд и главной точки. Как показано в *табл. 1*, вновь полученные величины остаточных рассогласований уменьшились ещё почти в три раза. Продолжать коррекцию каталога далее в рамках данного эксперимента не имеет смысла, так как уже полученный результат достаточно представителен.

Из *табл. 1* следует, что в результате второй коррекции каталога систематическая ошибка измерения координат всех звёзд по  $Al$  и  $Dt$  стала менее 0,5 угл. с. Каталожные координаты звёзд

приблизилась к фактическим центрам распределения облаков ошибок измерения, что говорит о принципиальной возможности учесть в каталоге наблюдательные особенности прибора.

Однако в деталях картина не столь оптимистична. Только две звезды SAO 40999 и SAO 40925 после коррекции показали  $dAI = -0,004$  и  $-0,003$  угл. с,  $dDt = -0,013$  и  $0,014$  угл. с соответственно. В то же время звезда SAO 41010 показала  $dAI = -0,333$  угл. с и  $dDt = 0,143$  угл. с, что соответственно в 80 и в 10 больше, чем у двух предыдущих. Ошибки измерения координат остальных звёзд заняли промежуточные значения.

Для понимания особенностей «поведения» звёзд препарируем серию из 12 кадров, в каждый из которых входит 9 из представленных в *табл. 1* каталожных звёзд, обозначенных тонировкой.

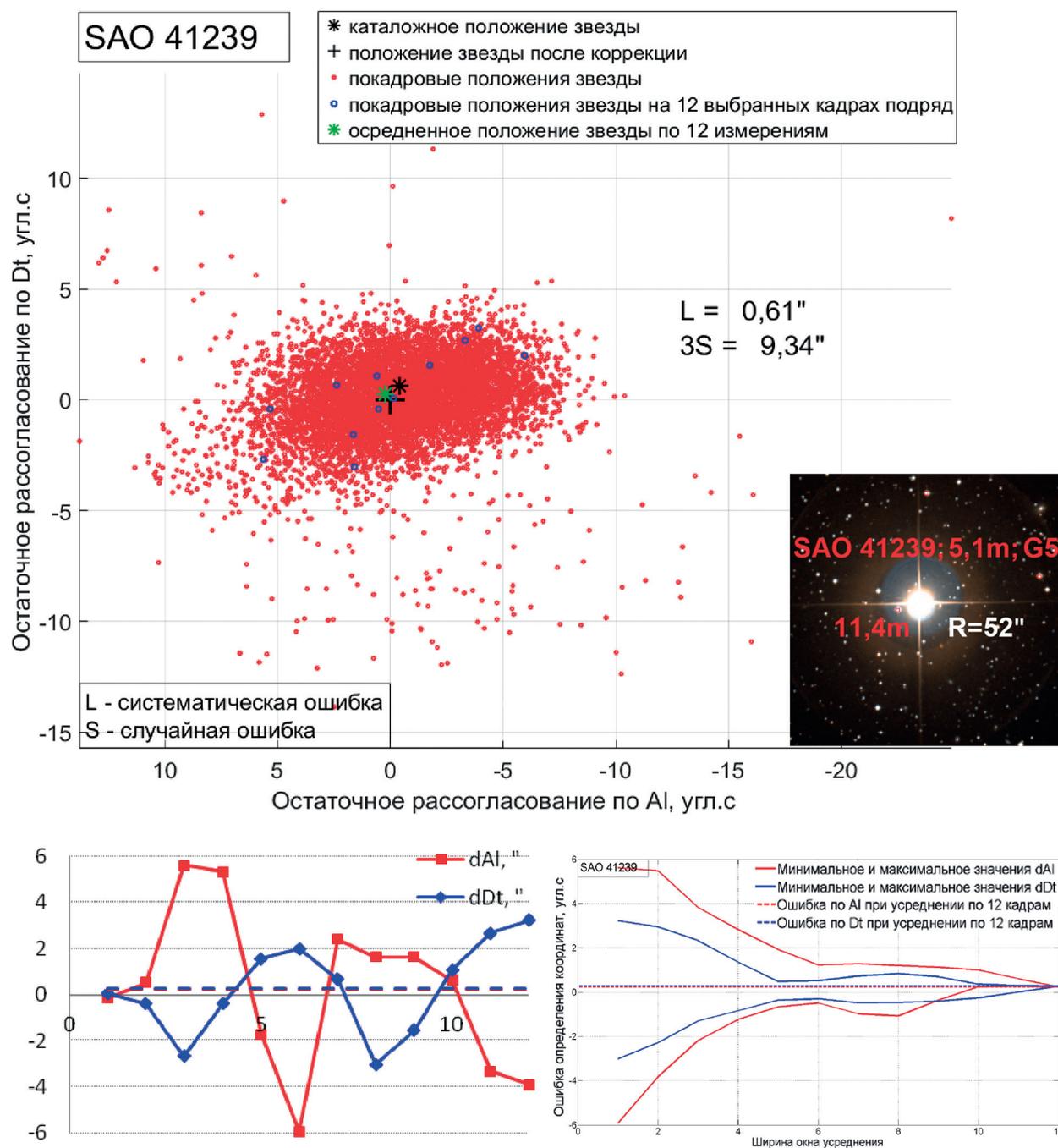


Рис. 1. Особенности звезды SAO 41239

Самой «хорошей» в этой серии кадров оказалась звезда SAO 41239. Результаты её исследования приведены на *рис. 1* (см. с. 62). На фрагменте карты небесной сферы вверху красными точками показано облако ошибок большого, около 7000, числа измерений координат звезды. Видно, что центр распределения облака ошибок находится в непосредственной близости как от уточнённого, так и от старого каталожного положения звезды. К незначительному смещению облака ошибок по отношению к её каталожному значению приводит находящаяся на расстоянии  $R = 52$  угл.с звезда с магнитудой 11,4<sup>m</sup> (согласно первому релизу каталога Gaia). Изображение звезды и её ближайшей окрестности приведено из Паломарского обзора (The Palomar Digital Sky Survey (DPOSS, <http://www.astro.caltech.edu/~george/dposs/>), VizieR, CDS (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>). На плотное облако ошибок синими точками наложены результаты наблюдения той же звезды, полученные по 12 кадрам.

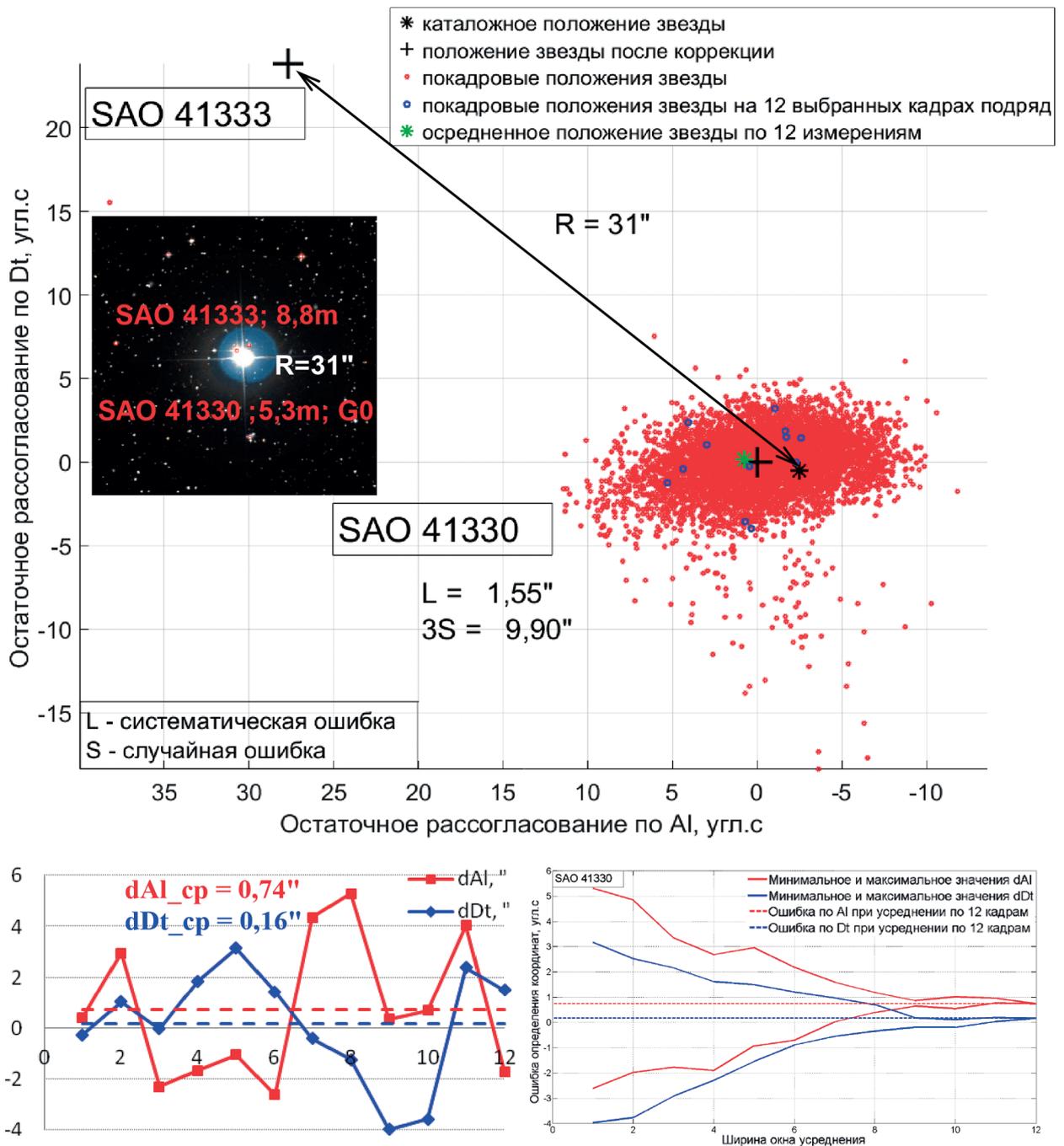


Рис. 2. Особенности звезды SAO 41330

Видно, что в результате коррекции положение центра облака ошибок вплотную приблизилось к новому каталожному значению координат звезды. При этом значения случайной ошибки измерения, вычисленные по большому и малому числам измерений, примерно совпадают.

Левый график внизу показывает, что ошибки измерения колеблются вокруг незначительной по величине систематической ошибки, а график экстремумов быстрой сходимостью подтверждает случайный характер ошибок в каждом такте измерений. График экстремумов построен по точкам, полученным из одиночных и суммированных по два, три и т. д. измерений.

Примерно также ведёт себя звезда SAO 41330, препарирование которой показано на рис. 2 (см. с. 63). На расстоянии  $R = 31$  угл.с от неё находится звезда SAO 41333 с магнитудой  $8,8^m$ . Здесь коррекция каталога также выполняет облагораживающую роль, сближая центр облака ошибок с новым значением каталожных координат звезды. Значения случайной ошибки измерения, вычисленные по малой и большой выборкам, также отличаются незначительно.

Обе пары звёзд для прибора с угловым разрешением 55 угл.с/пиксель воспринимаются как один объект, который можно указывать в бортовом каталоге под одним именем с соответствующей поправкой координат.

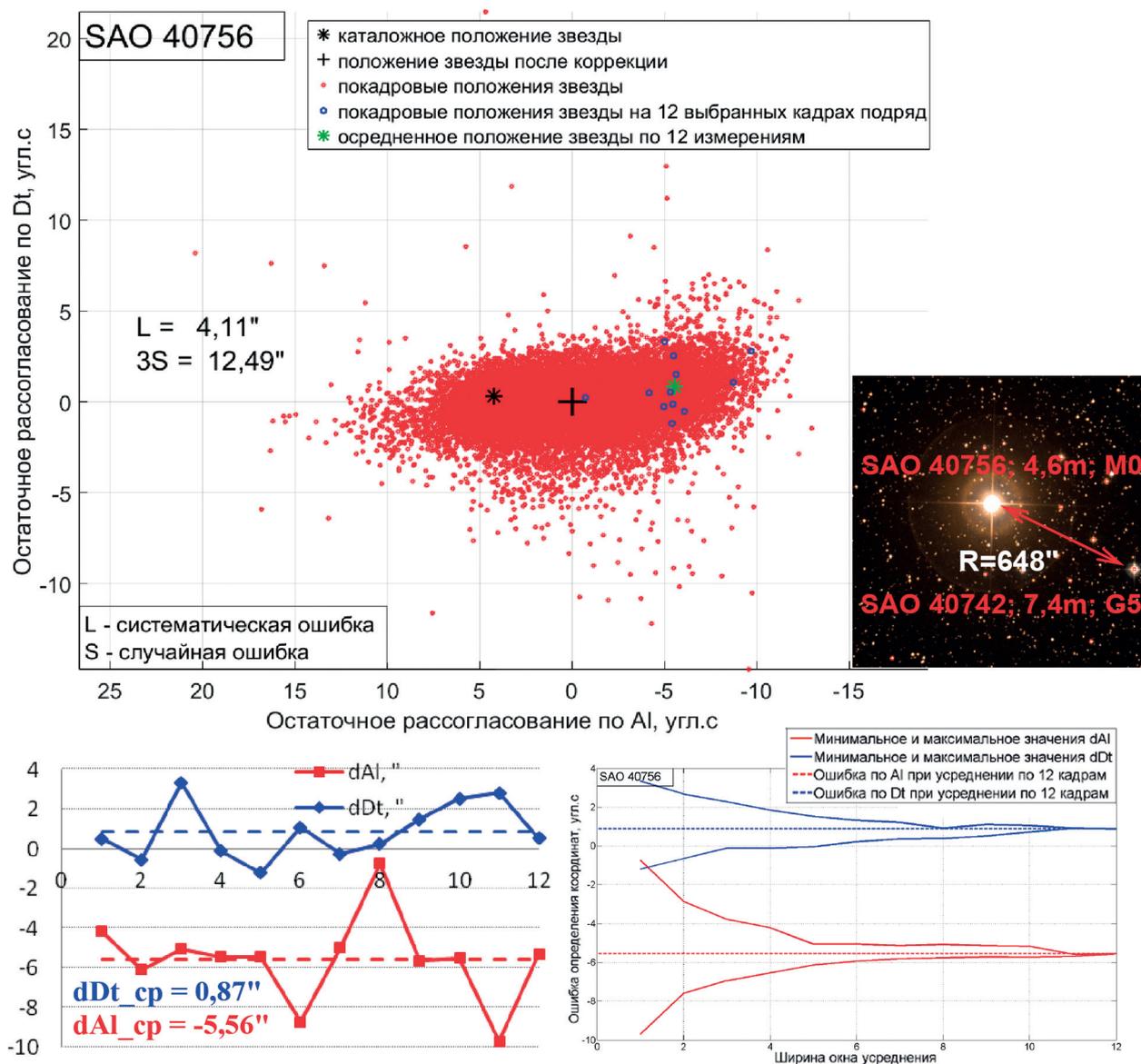


Рис. 3. Особенности звезды SAO 40756

В обоих приведённых на *рис. 1* и *2* примерах соседняя звезда вносит свой вклад в энергию, попадающую на центральный или соседний с ним пиксель матрицы, формирующий изображение каталожной звезды. Несколько иначе выглядит картина, когда соседняя звезда влияет на пиксели, находящиеся на периферии передаточной функции каталожной звезды, где даже небольшие флуктуации порога отсечки могут приводить к значительным ошибкам измерения.

Звезда SAO 40756, показанная на *рис. 3* (см. с. 64), демонстрирует именно такую картину. Коррекция каталога, основанная на большой статистике, как и в предыдущих случаях, сблизила центр распределения ошибки измерения с новыми каталожными координатами звезды, что хорошо видно на фрагменте карты небесной сферы слева вверху рисунка. В то же время статистика по 12 кадрам на фрагменте карты справа указывает, что центр облака ошибок смещён по оси *Al* на 5,56 угл. с.

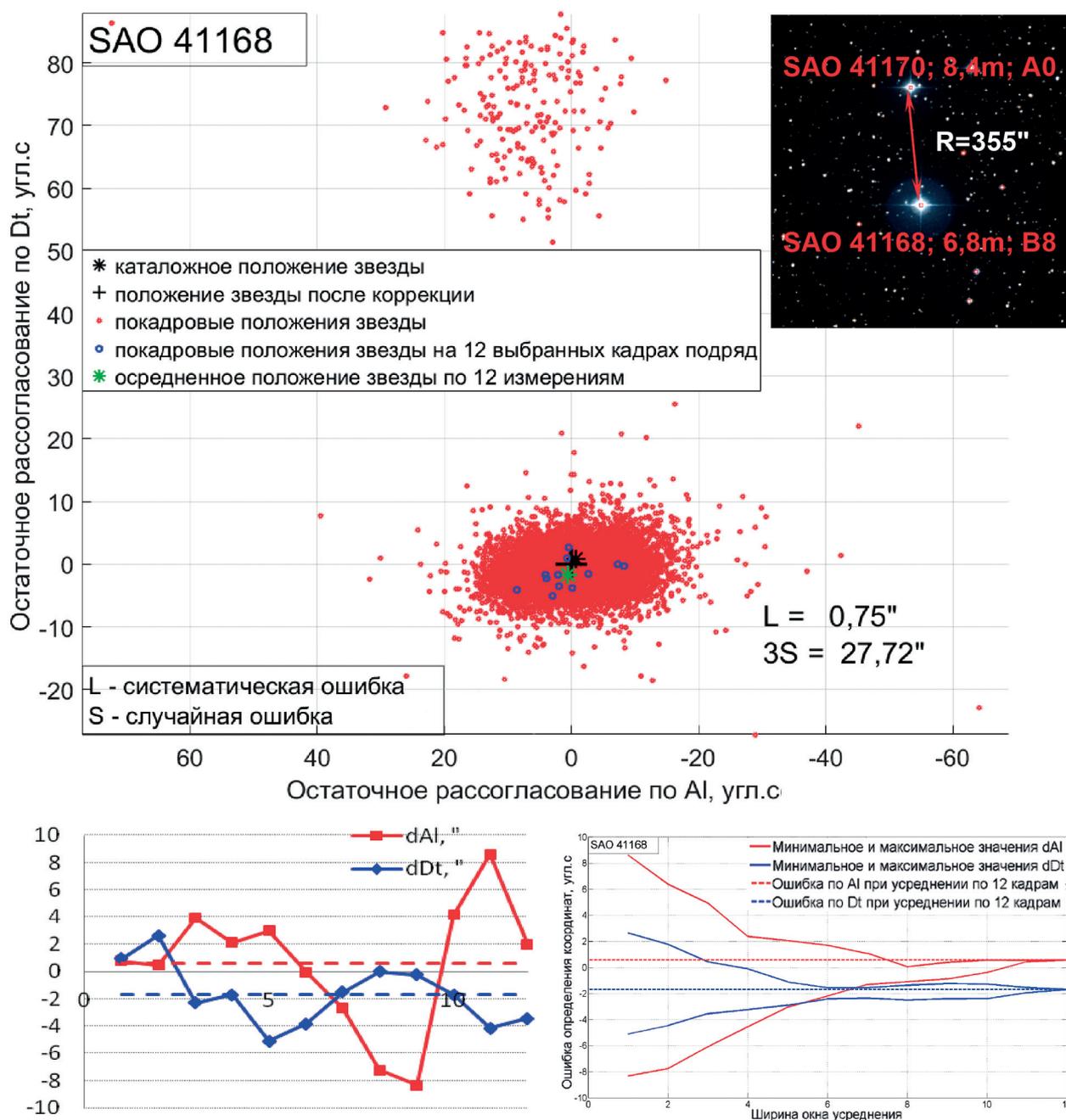


Рис. 4. Особенности звезды SAO 41168

Сопоставим это число с величиной случайной ошибки измерения. Величины случайных ошибок по большой и по малой статистикам отличаются друг от друга в два раза. Это говорит о том, что при прохождении звезды через поле зрения прибора низкопериодическая ошибка измерения её координат может достигать величины  $\pm 5,5$  угл. с.

Звезда SAO 40756 относится к спектральному классу M и плохо согласуется со спектральной характеристикой используемого в приборе объектива и фотоприёмной матрицы. Число пикселей, образующих её изображение, как минимум в два раза превышает среднее их значение для остальных звёзд. С учётом неравномерности чувствительности по полю изображения прибора число занятых звездой пикселей при движении по нему от краёв к центру может изменяться. Синхронно с ними изменяется и число пикселей, занятых соседней звездой SAO 40742. В какие-то моменты времени из-за наложения передаточных функций периферийные пиксели звезды SAO 40756 получают дополнительную энергию от соседней звезды и смещают её положение по отношению к каталожному значению. Именно такой момент и оказался зафиксированным двенадцатью синими точками, изображёнными на фрагменте карты на *рис. 3*.

Более или менее подобная картина просматривается и в наблюдениях звезды SAO 41168, иллюстрируемых *рис. 4* (см. с. 65). Здесь по фрагменту карты в левом верхнем углу рисунка видно, что некоторое количество измерений звезды формирует второе, гораздо менее плотное облако ошибок. Оно, несомненно, образуется за счёт соседней звезды SAO 41170 и малых флуктуаций порога отсечки. Второе облако отстоит от главного на весьма большую величину около 70 угл. с. Входящие в него измерения наверняка бракуются бортовым алгоритмом, но в эти моменты звезда SAO 41168 перестаёт участвовать в процессе измерения параметров ориентации, что тоже плохо.

Статистика по малой выборке не может быть такой же представительной, как по большой. Однако концентрация измерений в малой выборке внутри ограниченной части площади большой выборки однозначно свидетельствует о проявлении ещё одной причины низкопериодической ошибки измерения. В *табл. 2* приведены данные о величине случайной составляющей погрешности измерения, вычисленные по малой и большой статистикам.

Таблица 2. Величины систематической и случайной ошибок измерения, вычисленные по малой и большой статистикам

$N_{SAO}$	$Sp$	$dAl$ , угл. с	$dDt$ , угл. с	$L$ , угл. с	СКО_ $dAl$ , угл. с	СКО_ $dDt$ , угл. с	$S$ , угл. с по малой статистике	$S$ , угл. с по большой статистике
41076	K2	0,091	0,418	0,422	2,581	1,029	1,973	2,412
41239	G5	0,224	0,267	0,314	3,361	1,910	3,130	3,113
41288	K5	-1,024	0,394	0,830	2,140	1,851	2,399	3,471
41330	G0	0,739	0,161	0,559	2,673	2,133	2,881	3,299
41130	K0	0,934	-0,400	0,755	1,801	2,111	2,446	3,356
41109	B9	1,836	-0,039	1,244	6,398	3,199	5,385	4,659
41134	B8	2,026	-0,338	1,557	4,320	2,639	4,180	6,595
41168	B8	0,566	-1,703	1,747	4,561	2,164	3,815	9,245
40756	M0	-5,564	0,869	3,966	2,107	1,359	1,999	3,084

Нет смысла продолжать дальше детальное описание поведения каждой из девяти звёзд на исследуемом участке. Применяя инструментальные методы для наблюдения звёзд и используя их как путеводные ориентиры, необходимо помнить, что каждая из них имеет свои индивидуальные особенности, которые нам следует принимать как данность. Статистический метод позволяет выявлять эти особенности и использовать их для коррекции звёздного каталога.

Имея опыт препарирования уже нескольких десятков звёзд, можно смело утверждать, что причины, приводящие к появлению эффекта смещения измеренных координат звёзд по отношению к их каталожным значениям в короткофокусных системах, непосредственно связаны

с близким соседством каталожных звёзд с другими звёздами, находящимися в их окружении. Очевидно также, что перемещение каталожных значений координат звёзд в центры распределения ошибок измерения их координат может дать принципиальное решение задачи приведения каталога в соответствие с наблюдательными возможностями прибора, но только в одном случае: когда сам прибор является идеальным измерительным инструментом. К сожалению, это далеко не так.

Предпринятые исследования соответствия наблюдательных свойств звёздных датчиков используемым в них звёздным каталогам выявило целый комплекс недостатков как самих приборов, так и ряда методических вопросов, связанных с калибровками приборов и составлением бортовых каталогов. Попробуем перечислить некоторые из них.

1. Разные экземпляры приборов имеют различия в настройках. Наиболее заметна разница в остроте фокусировки. Необходимо строго контролировать идентичность всех настроек приборов. Любое проявление индивидуальности приборов может привести к отклонению измеренных координат звёзд по отношению к ожидаемым значениям.

2. Порог отсечки в звёздных датчиках ориентации всегда рассматривался как некоторый технический параметр, необходимый для того, чтобы отделить сигнал звезды от фона. Его величина практически всегда вычисляется в приборах без учёта астрономических факторов, что оказывается неверным.

3. Придавая большое значение геометрической калибровке звёздных приборов, разработчики часто недооценивают роль фотометрической калибровки. В результате неоднородность чувствительности приборов по полю зрения в сочетании с порогом отсечки, рассчитываемым на основе измерения амплитуд сигналов от звезды и от фона, ведёт к ошибкам в измерениях координат звёзд.

4. Отбор звёзд для бортового каталога должен вестись с учётом углового разрешения прибора, его спектральной характеристики и реально измеренной ФРТ. Кроме того, при использовании центроидного метода измерения координат звёзд должно учитываться возможное влияние соседних звёзд вне зависимости от их звёздной величины.

Несомненно, недостатки звёздных приборов как технического, так и методического характера со временем будут устранены, что повысит эффективность использования статистического метода коррекции бортового каталога, который ещё совсем недавно мог считаться единственно возможным. Сейчас это уже далеко не так. Ситуация изменилась в 2013 г. с началом реализации второго Европейского астрометрического проекта Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics, <http://gea.esac.esa.int/archive/>). Работы по этому проекту ещё не завершены, но уже созданные версии нового каталога звёзд открывают возможности для решения задачи иным путём, основанным не на статистике измерений, а на методах математического моделирования. На сегодняшний день только Gaia способен предоставить для этих целей всенебесный каталог звёзд, содержащий все необходимые для этого данные (Gaia Archive).

Из всего вышеизложенного становится понятно, что статистический метод нельзя рассматривать как магистральный путь составления или коррекции бортовых каталогов. Но с его помощью можно выявлять недостатки как самих приборов, так и используемых в них каталогов и устранять некоторые из них и при наземной обработке данных, и в полёте, что само по себе имеет самостоятельное практическое значение.

## Литература

1. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Сметанин П.С., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. (2018а) Особенности измерения координат звёзд оптико-электронными приборами с различными угловыми разрешениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 39–47.
2. Аванесов Г.А., Снеткова Н.И., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. (2018б) Исследование звёзд участка небесной сферы двумя датчиками звёздной ориентации БОКЗ-М60 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 48–59.

## An experiment for the correction of the onboard catalogue fragment of the BOKZ-M60 star tracker

G. A. Avanesov, A. N. Kurkina, O. V. Filippova, Ya. D. Elyashev

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

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

The data calculated in (Avanesov et al., 2018b) was used for correcting the coordinates of the compact group of 25 stars from the BOKZ-M60 star tracker onboard catalogue. With the use of the refined catalogue, the calculations of the orientation parameters were carried out by a series of frames of the celestial sphere section observation where these stars were concentrated. The random and systematic components of the stars' coordinates measurement errors, as well as errors of determining the main point's coordinates were estimated. The correction of the stars' coordinates of the onboard catalog really leads to a significant reduction of systematic errors in the measurements of the stars' coordinates and, accordingly, the main point's coordinates. Thus, the expediency of bringing the onboard catalogue into conformity with the instrument's observational capabilities is confirmed. However, the use of the statistical method to bring the onboard star catalogues into conformity with the observational capabilities of star trackers is hardly feasible in modern conditions. The emergence of the latest star catalogues created within the framework of the European project Gaia makes it more promising to directly convert the coordinates of the stars specified in it into the coordinates of the stars of the onboard catalog, taking into account the observational capabilities of the instrument used.

**Keywords:** star tracker, astrometry, stars catalogue, systematic error, random error, background radiation, neighborhood of catalog stars, centroidal method, catalogue correction, statistical approach

Accepted: 02.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-60-68

### References

1. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Smetanin P. S., Filippova O. V., Elyashev Ya. D., Osobennosti izmereniya koordinat zvezd optiko-elektronnyimi priborami s razlichnymi uglovymi razresheniyami (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.
2. Avanesov G. A., Snetkova N. I., Filippova O. V., Elyashev Ya. D., Issledovanie zvezd uchastka nebesnoi sfery dvumya datchikami zvezdnoi oerientatsii BOKZ-M60 (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.