

## ОБ УПЛОТНЕНИИ КАТАЛОГА ICRF И НАДЕЖНОСТИ ЕГО СВЯЗИ С КАТАЛОГОМ GAIA

© 2022 г. З. М. Малкин<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Казанский федеральный университет, Казань, Россия

\*E-mail: malkin@gaoran.ru

Поступила в редакцию 06.05.2022 г.

После доработки 22.05.2022 г.

Принята к публикации 21.06.2022 г.

В работе исследованы два возможных источника случайных и систематических ошибок нового метода определения параметров взаимной ориентации каталогов положений внегалактических источников, реализующих небесную опорную систему координат International Celestial Reference System (ICRS). Этот метод основан на медианной фильтрации разностей координат общих объектов в сравниваемых каталогах, распределенных по равновеликим ячейкам на небесной сфере, образующим сетку пикселизации. Исследование проведено на базе сравнения последних версий реализации ICRS в радио (International Celestial Reference Frame, ICRF) и оптическом (Gaia-CRF) диапазонах. На основе нескольких вычислительных тестов проверена зависимость результатов определения параметров ориентации между каталогами ICRF и Gaia-CRF от числа ячеек и от смещения сетки пикселизации относительно начала координат по прямому восхождению. Оказалось, что результаты вычислений, полученные в разных тестовых вариантах, заметно различаются, но эти различия находятся в пределах формальных ошибок определения параметров ориентации. Дополнительные тестовые вычисления показали, что основным источником этих различий является неравномерное распределение общих источников сравниваемых каталогов по небесной сфере.

*Ключевые слова:* астрономические каталоги, сравнение каталогов

DOI: 10.31857/S0004629922090080

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных проблем современной фундаментальной астрометрии – создание и поддержание небесной опорной системы координат, в качестве которой Международным астрономическим союзом (МАС) с 1 января 1998 г. принята International Celestial Reference System (ICRS) [1]. Наиболее точными реализациями ICRS в настоящее время являются системы отсчета International Celestial Reference Frame (ICRF), полученная по наземным РСДБ-наблюдениям, и Gaia-CRF (Gaia Celestial Reference Frame), полученная по наблюдениям космического аппарата Gaia. Обе системы отсчета представляют собой каталоги координат компактных внегалактических источников, преимущественно квазаров. Последние версии этих каталогов – ICRF3 [2] и Gaia-CRF3 [3]. В свою очередь, ICRF3 состоит из трех каталогов ICRF3-SX, ICRF3-K и ICRF3-XKa, полученных по наблюдениям в радиодиапазонах S/X, K и X/Ka соответственно. Каталог ICRF3-SX из этих трех каталогов содержит наибольшее число источников и, кроме того, служит продолжением и расшире-

нием предыдущих версий ICRF, тоже составленных по наблюдениям в S/X диапазонах. Поэтому каталог ICRF3-SX в настоящее время рассматривается как определяющий систему ICRF3.

Сравнение каталогов ICRF и Gaia-CRF, прежде всего изучение их систематических разностей, представляет собой одну из наиболее важных тем современных астрометрических исследований. Такое сравнение используется для решения многих задач, особенно таких, как привязка каталога Gaia-CRF к ICRS и анализ систематических ошибок обоих каталогов. В частности, такой анализ служит необходимой частью процесса создания единой многоволновой системы отсчета ICRF, разработка которой является задачей специальной рабочей группы МАС<sup>1</sup>. Общие вопросы сравнения астрометрических каталогов рассматривались в [4, 5]. Различные практические аспекты сравнения каталогов ICRF и Gaia-CRF исследовались в [2, 3, 6–14].

<sup>1</sup> [https://www.iau.org/science/scientific\\_bodies/working\\_groups/329/](https://www.iau.org/science/scientific_bodies/working_groups/329/)

При сравнении астрометрических каталогов одну из основных проблем представляют собой аномальные разности (выбросы), которые могут существенно исказить результаты вычислений [7, 10, 13, 15]. В литературе, упомянутой выше, применялись различные методы выделения и исключения выбросов. В работе [16] был предложен новый метод определения параметров взаимной ориентации астрометрических каталогов, основанный на пикселизации небесной сферы с последующим вычислением медианного значения разностей для каждой ячейки сетки пикселизации. Основное преимущество этого метода заключается в том, что при его применении результаты вычислений параметров ориентации практически не зависят от наличия выбросов. Некоторые свойства этого метода более детально исследуются в настоящей работе. Краткое описание самого метода и его основных свойств приведено в разделе 2. В разделе 3 метод исследуется на примере каталогов ICRF3-SX и Gaia-CRF3, а в разделе 4 — на примере искусственных каталогов с симметричным расположением источников относительно экватора. В заключительном разделе 5 обсуждаются полученные результаты.

## 2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРИЕНТАЦИИ

В этом разделе кратко описан новый метод определения взаимной ориентации между астрометрическими каталогами, предложенный в [16]. При использовании этого метода вычисления осуществляются в три этапа. На первом этапе проводится пикселизация источников, при которой общие источники сравниваемых каталогов распределяются по сетке равновеликих (равной площади) ячеек на небесной сфере. На втором этапе в каждой ячейке сетки пикселизации вычисляются медианное значение разностей координат источников в двух каталогах и ошибка этого значения. Таким образом формируется новый набор данных с числом псевдоисточников, равным числу ячеек. За координаты этих псевдоисточников могут приниматься как реальные средние значения координат источников, попавших в данную ячейку, так и координаты геометрического центра ячейки. Как показано в [16] и подтверждено последующей практикой, оба варианта приводят к близким результатам. Окончательно параметры ориентации вычисляются путем применения к этому набору псевдоисточников желаемого метода анализа, обычно, разложения по ортогональным функциям.

В рассматриваемой здесь задаче сравнения каталогов необходимое число ячеек (разрешение) сетки пикселизации определяется желательным минимальным числом общих для двух каталогов источников в каждой ячейке. Исходя из результа-

тов тестовых вычислений, представленных в [16] и в следующих двух разделах настоящей работы, можно рекомендовать подбирать параметры сетки пикселизации таким образом, чтобы обеспечить не менее 5–10 источников в каждой ячейке в зависимости от качества сравниваемых каталогов.

В принципе, на первом этапе вычислений можно использовать любой способ пикселизации сферы на ячейки равной площади, суть рассматриваемого метода сравнения каталогов от этого не меняется. В работе [16] предлагается использовать метод SREAG (Spherical Rectangular Equal-Area Grid) [17], который представляется более подходящим для данной задачи, чем, например, широко используемый в астрономических работах метод HEALPix (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelization) [18], по нескольким причинам, основные из которых следующие:

- сетка SREAG состоит из прямоугольных ячеек, границы которых ориентированы по направлениям сетки координат, например, экваториальных или Галактических, обычно используемых в астрономии;
- сетка SREAG базируется на системе тороидальных колец почти равной ширины, т.е. почти равномерно распределенных по широте (склонению);
- метод SREAG позволяет строить сетки с несравненно большим набором разрешений (как будет показано ниже, это главное преимущество при работе с каталогами координат радиоисточников).

Для обеспечения базовых вычислений по методу SREAG разработано несколько подпрограмм на языке Fortran<sup>2</sup>.

Из других методов пикселизации данных на сфере, кроме обсуждавшихся в [17], можно отметить предложенные в [19, 20].

Основным параметром сетки SREAG является четное число колец  $N_{\text{ring}}$ , которое связано с числом ячеек  $N_{\text{cell}}$  как  $N_{\text{ring}} = 0.886227\sqrt{N_{\text{cell}}}$ . Разрешение сетки в градусах выражается через число колец как  $180/N_{\text{ring}}$ . Последняя формула позволяет легко определить необходимое число колец сетки исходя из желаемого разрешения.

В методе HEALPix основным параметром сетки является величина  $N_{\text{side}}$ , которая должна быть степенью 2, включая нулевую ( $N_{\text{side}} = 1$ ). При этом число колец равно  $4N_{\text{side}} - 1$ , а число ячеек —  $12 N_{\text{side}}^2$ .

<sup>2</sup> [http://www.gaoran.ru/english/as/ac\\_vlbi/](http://www.gaoran.ru/english/as/ac_vlbi/),  
<https://github.com/zmalkin4gt/SREAG>

**Таблица 1.** Параметры сеток пикселизации различного типа и разрешения

SREAG				HEALPix			
$N_{ring}$	$N_{cell}$	$A_{cell}$ , кв. град.	$N_{min}$	$N_{side}$	$N_{ring}$	$N_{cell}$	$A_{cell}$ , кв. град.
6	46	897	32	2	7	48	859
8	82	503	9	4	15	192	215
10	128	322	6	8	31	768	54
12	184	224	2				

Примечание. В столбцах приведены: число колец  $N_{ring}$ ; число ячеек  $N_{cell}$ ; площадь ячейки  $A_{cell}$ ; минимальное число общих источников ICRF3-SX и Gaia-CRF3 в одной ячейке  $N_{min}$ ; в правой части таблицы также приведен основной параметр сетки HEALPix  $N_{side}$ .

При использовании 32-битной арифметики можно построить более 20 тысяч сеток SREAG с разрешением от  $45^\circ$  до  $16''$  ( $N_{ring} = 4, 6, 8, \dots, 41068$ ) против 14 сеток HEALPix с разрешением от  $59^\circ$  до  $26''$  ( $N_{side} = 2^k, k = 0 \dots 13$ ) [18]. Это свойство метода SREAG особенно важно при работе с крупномасштабными сетками, потому что позволяет легче подобрать наиболее подходящий для решаемой задачи набор сеток пикселизации с детальной настройкой параметров. Как можно видеть из примеров в последующих разделах работы, при сравнении каталогов ICRF3 и Gaia можно реально рассматривать две сетки SREAG с  $N_{ring} = 8$  или 10 и, фактически, ни одной сетки HEALPix – сетка с  $N_{side} = 2$  является слишком грубой, а следующая сетка с  $N_{side} = 4$ , наоборот, имеет слишком мелкие ячейки, при которых нельзя обеспечить необходимое минимальное число источников в каждой ячейке (см. табл. 1).

### 3. СРАВНЕНИЕ КАТАЛОГОВ ICRF3-SX И GAIA

Для определения параметров взаимной ориентации двух каталогов в этой работе использовался метод разложения разностей координат общих источников в сравниваемых каталогах по векторным сферическим функциям (ВСФ), который наиболее широко используется в настоящее время для таких задач [21–23]. Было использовано разложение по ВСФ первого порядка, что соответствует основным физически значимым параметрам взаимной ориентации между каталогами. Тогда основные параметры взаимной ориентации двух каталогов определяются следующим образом [22]:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha^* &= R_1 \cos \alpha \sin \delta + R_2 \sin \alpha \sin \delta - \\ &\quad - R_3 \cos \delta - G_1 \sin \alpha + G_2 \cos \alpha, \\ \Delta\delta &= -R_1 \sin \alpha + R_2 \cos \alpha - G_1 \cos \alpha \sin \delta - \\ &\quad - G_2 \sin \alpha \sin \delta + G_3 \cos \delta, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathbf{R}(R_1, R_2, R_3)$  – вектор взаимного поворота и  $\mathbf{G}(G_1, G_2, G_3)$  – вектор центрального смещения (в англоязычной литературе – glide [22]). Вектор  $\mathbf{G}$  описывает деформацию координат в направлении некоторого центра, например, видимые движения источников, вызванные переменной частью Галактической аберрации, обусловленной вращением Солнечной системы вокруг центра Галактики [24, 25]. Шесть коэффициентов разложения (1) вычисляются методом наименьших квадратов по общим источникам в сравниваемых каталогах.

Добавление в вычисления членов разложения по ВСФ более высокого порядка не меняет существенно результаты, приведенные ниже. Надо заметить, что при применении метода пикселизации SREAG максимально возможный порядок разложения равен  $N_{ring}/2$ . Поскольку, как показано в [16], результаты определения параметров ориентации этим методом практически независимы от влияния выбросов, в данной работе были использованы все общие источники каталогов ICRF3-SX и Gaia-CRF3.

В левой части табл. 1 приведены параметры нескольких сеток SREAG, которые могут быть использованы при сравнении каталогов ICRF3-SX и Gaia-CRF3. Для сравнения в правой части таблицы приведены параметры первых трех сеток HEALPix. При использовании сетки с  $N_{ring} = 14$ ,  $N_{min} = 1$ , а при использовании сетки с  $N_{ring} = 16$  остаются пустые ячейки, где нет ни одного общего источника. Наличие, в худшем случае, двух источников в ячейке, что наблюдается при использовании сетки с  $N_{ring} = 12$ , вообще говоря, тоже не дает возможности разумно применять какую-либо статистику, но этот вариант был использован в дальнейших вычислениях для тестовых целей. На рис. 1 приведено распределение по небесной сфере источников сравниваемых каталогов для этих вариантов, а в табл. 2 – результаты вычислений параметров ориентации.

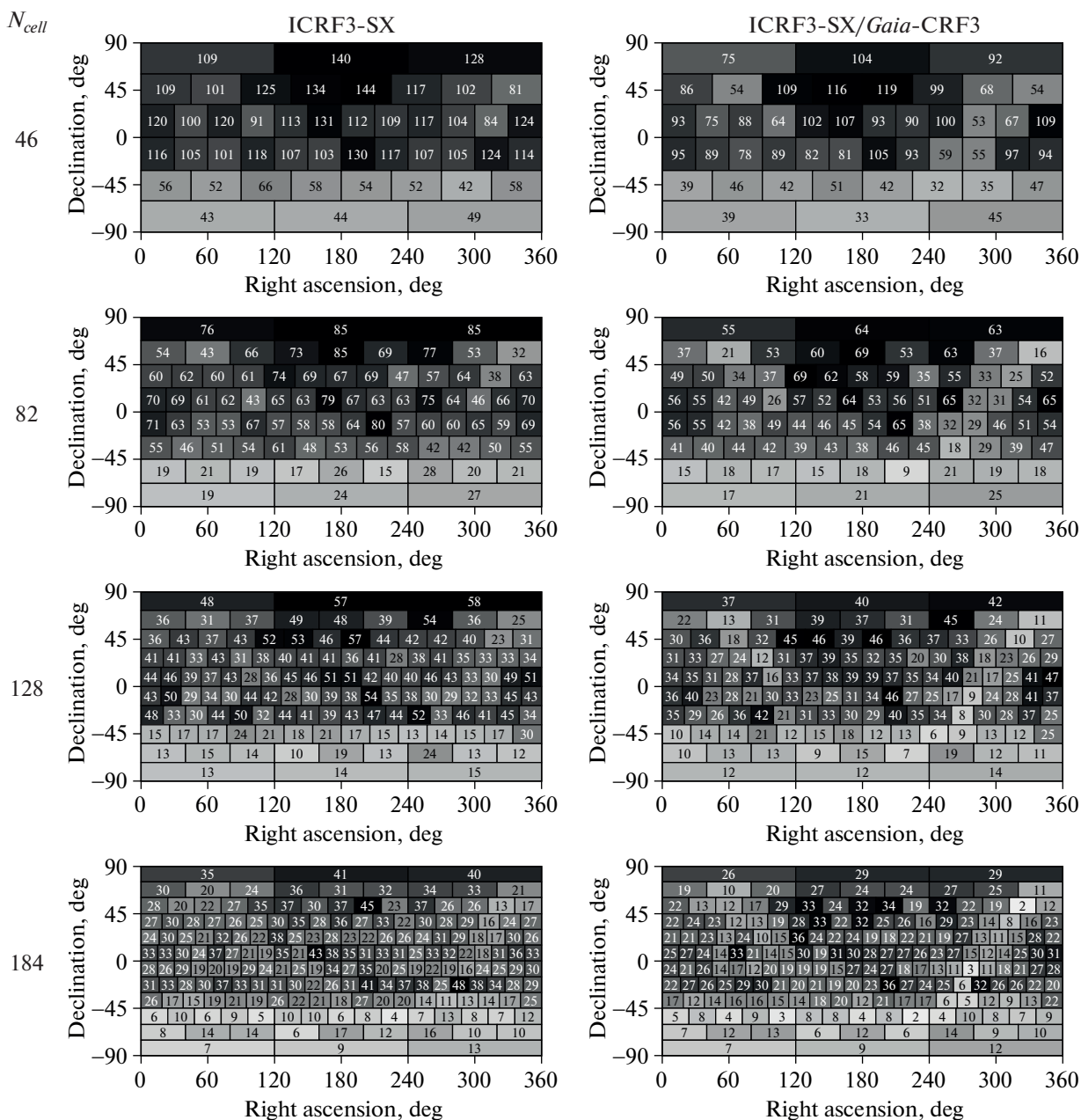


Рис. 1. Распределение по небесной сфере источников ICRF3-SX (левый столбец) и общих источников ICRF3-SX и Gaia-CRF3 (правый столбец) для разного числа ячеек равной площади на небесной сфере  $N_{cell}$ . В каждой ячейке указано число попавших в нее источников.

Данные табл. 2 показывают, что вариант пикселизации с 184 ячейками оказывается мало подходящим для данной задачи ввиду недостатка общих источников и их очень неравномерного распределения по ячейкам. Вследствие этого ошибки параметров ориентации оказались значительно больше, чем для сеток с 82 и 128 ячейками. Кроме того, в этом варианте значения некоторых параметров выглядят аномальными, что

может объясняться недостаточной фильтрацией выбросов при столь малом числе источников во многих ячейках сетки пикселизации. Сетка с 46 ячейками выглядит слишком грубой и ее использование тоже приводит к завышенным формальным ошибкам параметров ориентации, скорее всего из-за малого числа ячеек (псевдоисточников). Варианты сетки пикселизации с 82 и 128 ячейками выглядят оптимальными для дан-

**Таблица 2.** Параметры взаимной ориентации каталогов ICRF3-SX и Gaia-CRF3 для разного числа ячеек равной площади на небесной сфере  $N_{\text{cell}}$  (мкс дуги)

$N_{\text{cell}}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$G_1$	$G_2$	$G_3$
46	$12.5 \pm 13.7$	$14.4 \pm 13.4$	$-9.7 \pm 12.1$	$-8.4 \pm 13.2$	$-5.1 \pm 12.3$	$13.2 \pm 13.6$
82	$21.3 \pm 11.6$	$27.4 \pm 10.6$	$-4.8 \pm 10.0$	$1.3 \pm 10.5$	$-3.4 \pm 10.2$	$12.6 \pm 11.4$
128	$15.6 \pm 12.2$	$20.7 \pm 11.0$	$-0.7 \pm 10.0$	$-2.1 \pm 10.7$	$-2.9 \pm 10.8$	$7.4 \pm 11.5$
184	$55.1 \pm 14.3$	$26.3 \pm 14.0$	$-7.5 \pm 13.4$	$2.2 \pm 14.0$	$-20.9 \pm 13.3$	$49.2 \pm 14.4$

**Таблица 3.** Зависимость параметров взаимной ориентации каталогов ICRF3-SX и Gaia-CRF3 от смещения сетки пикселизации по прямому восхождению (Shift) для разного числа ячеек равной площади на небесной сфере  $N_{\text{cell}}$  (мкс дуги)

Shift, °	$N_{\text{cell}}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$G_1$	$G_2$	$G_3$
6	82	$15.0 \pm 11.9$	$24.1 \pm 11.3$	$-3.3 \pm 10.2$	$2.4 \pm 11.0$	$-8.0 \pm 10.6$	$4.7 \pm 11.6$
	128	$7.4 \pm 11.8$	$23.0 \pm 11.0$	$4.2 \pm 10.3$	$-5.2 \pm 10.7$	$-3.6 \pm 10.6$	$14.7 \pm 11.6$
12	82	$14.4 \pm 12.1$	$25.4 \pm 11.7$	$-7.0 \pm 10.5$	$-2.3 \pm 11.1$	$-4.0 \pm 11.1$	$10.7 \pm 12.1$
	128	$6.2 \pm 12.1$	$23.3 \pm 11.4$	$0.8 \pm 10.6$	$-6.2 \pm 11.1$	$-2.5 \pm 11.1$	$7.7 \pm 11.8$
18	82	$10.9 \pm 11.9$	$29.2 \pm 11.4$	$-5.5 \pm 10.3$	$-2.2 \pm 11.0$	$0.1 \pm 10.8$	$11.9 \pm 11.8$
	128	$14.5 \pm 12.3$	$28.5 \pm 11.4$	$-6.4 \pm 10.3$	$-4.6 \pm 10.8$	$1.2 \pm 11.1$	$17.6 \pm 11.7$

ных каталогов. Результаты, полученные для этих вариантов, оказались очень близки, как в отношении значений параметров ориентации, так и в отношении их ошибок.

Вторым тестом для выявления возможных ошибок рассматриваемого метода сравнения каталогов стала проверка зависимости результатов вычисления параметров ориентации от разворота сетки пикселизации по прямому восхождению. Для этого были повторены предыдущие вычисления для двух оптимальных сеток с 82 и 128 ячейками, повернутыми на углы 6°, 12° и 18° по прямому восхождению. Результаты вычислений в этих вариантах, представленные в табл. 3, и их сопоставление с данными табл. 2 показывают, что параметры ориентации, определенные в разных тестовых вариантах, заметно отличаются между собой, хотя, строго говоря, наблюдаемые различия остаются в пределах ошибок определения.

Наиболее вероятная причина зависимости параметров взаимной ориентации каталогов ICRF3-SX и Gaia-CRF3 от конфигурации вычислительной схемы заключается в сильной неравномерности распределения общих источников в сравниваемых каталогах по небесной сфере (рис. 1). Поскольку эта зависимость выглядит несколько слабее для сетки с 82 ячейками, можно предположить, что для большей устойчивости решения желательно иметь больше источников в каждой ячейке сетки пикселизации, что, в общем, понят-

но априори. Для проверки этих предположений были проведены дополнительные тесты с искусственными каталогами, приведенные в следующем разделе.

#### 4. СРАВНЕНИЕ ТЕСТОВЫХ КАТАЛОГОВ

В результатах, представленных в предыдущем разделе, прослеживается зависимость параметров ориентации между каталогами ICRF3-SX и Gaia-CRF3 от числа ячеек сетки пикселизации и поворота сетки относительно начала координат. Эту зависимость можно считать существенной, хотя формально различия между параметрами, вычисленными в разных вариантах, не являются статистически значимыми. Как отмечалось выше, наиболее вероятная причина этой зависимости заключена в неравномерности распределения источников по небу. Как видно из рис. 1, основными факторами этого эффекта являются асимметрия север-юг и разрежение в области Галактического экватора. Причем последнее характерно как для каталогов ICRF, полученных методом РСДБ, так и оптических каталогов Gaia. Таким образом, долготная неравномерность распределения общих источников ICRF и Gaia-CRF носит, можно сказать, объективный характер. В свою очередь асимметрия север-юг характерна только для РСДБ-каталогов и объясняется, в первую очередь, неравномерным распределением наблюдательных станций по поверхности Зем-

**Таблица 4.** Параметры взаимной ориентации тестовых каталогов для разного числа ячеек равной площади на небесной сфере  $N_{\text{cell}}$  (мкс дуги)

$N_{\text{cell}}$	$N_{\text{min}}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$G_1$	$G_2$	$G_3$
46	99	$0.6 \pm 9.7$	$-0.2 \pm 9.0$	$-4.7 \pm 8.2$	$-6.8 \pm 8.7$	$1.7 \pm 8.5$	$-0.5 \pm 9.7$
82	34	$0.2 \pm 8.5$	$0.1 \pm 7.7$	$-3.5 \pm 7.0$	$-2.4 \pm 7.5$	$8.3 \pm 7.2$	$-0.1 \pm 8.4$
128	22	$0.1 \pm 8.4$	$0.0 \pm 7.8$	$1.1 \pm 7.0$	$-3.3 \pm 7.6$	$1.1 \pm 7.2$	$0.0 \pm 8.4$

**Таблица 5.** Зависимость параметров взаимной ориентации тестовых каталогов от смещения сетки пикселизации по прямому восхождению (Shift) для разного числа ячеек равной площади на небесной сфере  $N_{\text{cell}}$  (мкс дуги)

Shift, °	$N_{\text{cell}}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$G_1$	$G_2$	$G_3$
6	82	$0.1 \pm 8.3$	$0.0 \pm 7.8$	$-2.4 \pm 7.2$	$-9.4 \pm 7.6$	$1.0 \pm 7.3$	$-0.1 \pm 8.4$
	128	$0.1 \pm 8.4$	$0.0 \pm 7.9$	$3.2 \pm 7.2$	$-7.4 \pm 7.7$	$-2.1 \pm 7.4$	$-0.1 \pm 8.4$
12	82	$0.0 \pm 9.3$	$0.1 \pm 9.0$	$-1.8 \pm 8.1$	$-8.3 \pm 8.5$	$0.1 \pm 8.4$	$0.0 \pm 9.5$
	128	$0.1 \pm 8.1$	$0.0 \pm 7.6$	$-1.8 \pm 7.0$	$-7.3 \pm 7.3$	$4.2 \pm 7.3$	$0.0 \pm 8.1$
18	82	$0.2 \pm 9.0$	$0.1 \pm 8.7$	$-1.6 \pm 7.7$	$-8.7 \pm 8.1$	$3.8 \pm 8.1$	$-0.1 \pm 9.2$
	128	$0.0 \pm 8.0$	$0.1 \pm 7.5$	$-1.9 \pm 6.7$	$-7.5 \pm 7.0$	$5.7 \pm 7.1$	$0.0 \pm 8.0$

ли. По мере ввода в строй новых РСДБ-станций в южном полушарии и интенсификации наблюдательных программ с участием южных станций этот недостаток каталога ICRF постепенно исправляется.

В работе [16] для оценки влияния этого эффекта были проведены тестовые вычисления с каталогом OCARS [26]. Каталог OCARS содержит в два с лишним раза больше общих источников с Gaia-CRF3, чем ICRF3-SX, но их распределение по небу тоже не вполне равномерно, хотя и лучше, чем это наблюдается для каталога ICRF3-SX. Поэтому в настоящей работе в качестве тестового был сделан искусственный каталог, в котором скорректирована асимметрия вида север-юг. Этот каталог был получен объединением исходного каталога ICRF3-SX и его зеркального отражения относительно экватора. Для вычисления параметров ориентации таким же образом был получен тестовый каталог общих источников ICRF3-SX и Gaia-CRF3. Таким образом, тестовые искусственные каталоги содержат в два раза больше источников, чем исходные, с их симметричным расположением относительно экватора, как показано на рис. 2. При этом следует учесть, что для тестовых каталогов, построенных описанным образом, число выбросов также удвоилось, что может налагать более жесткие требования к минимальному числу источников в ячейке. С этими тестовыми каталогами были проведены такие же вычисления, как с реальными каталогами ICRF3-SX и Gaia-CRF3, описанные в преды-

дущем разделе. Результаты этих вычислений приведены в табл. 4 и 5.

Сравнение данных табл. 4 и 2 показывает, что для тестовых каталогов зависимость параметров ориентации от числа ячеек сетки пикселизации  $N_{\text{cell}}$  намного слабее, чем для реальных каталогов. Также можно отметить уменьшение ошибок параметров ориентации примерно в полтора раза. Сами коэффициенты разложения по ВСФ, полученные для тестовых каталогов, не имеют в данном случае научного смысла. Важны их ошибки и разброс между вариантами вычислений в сравнении с результатами, полученными с реальными каталогами (раздел 3).

Аналогичные выводы можно сделать из сравнения табл. 5 и 3. Зависимость параметров ориентации от смещения сетки пикселизации по прямому восхождению для тестовых каталогов также оказалась намного слабее, чем для реальных каталогов. Случайные ошибки определения параметров ориентации тоже оказались почти в полтора раза меньше, чем они были при вычислениях с реальными каталогами.

Отметим в заключение этого раздела, что трудно сделать тестовый каталог и с практически равномерным распределением источников по небесной сфере, но, во-первых, реализация такого каталога на практике мало реалистична, а во-вторых, такой тест мало интересен, поскольку предсказуемо не покажет сколь-нибудь значимых отличий между результатами тестовых вычислений, описанных выше.

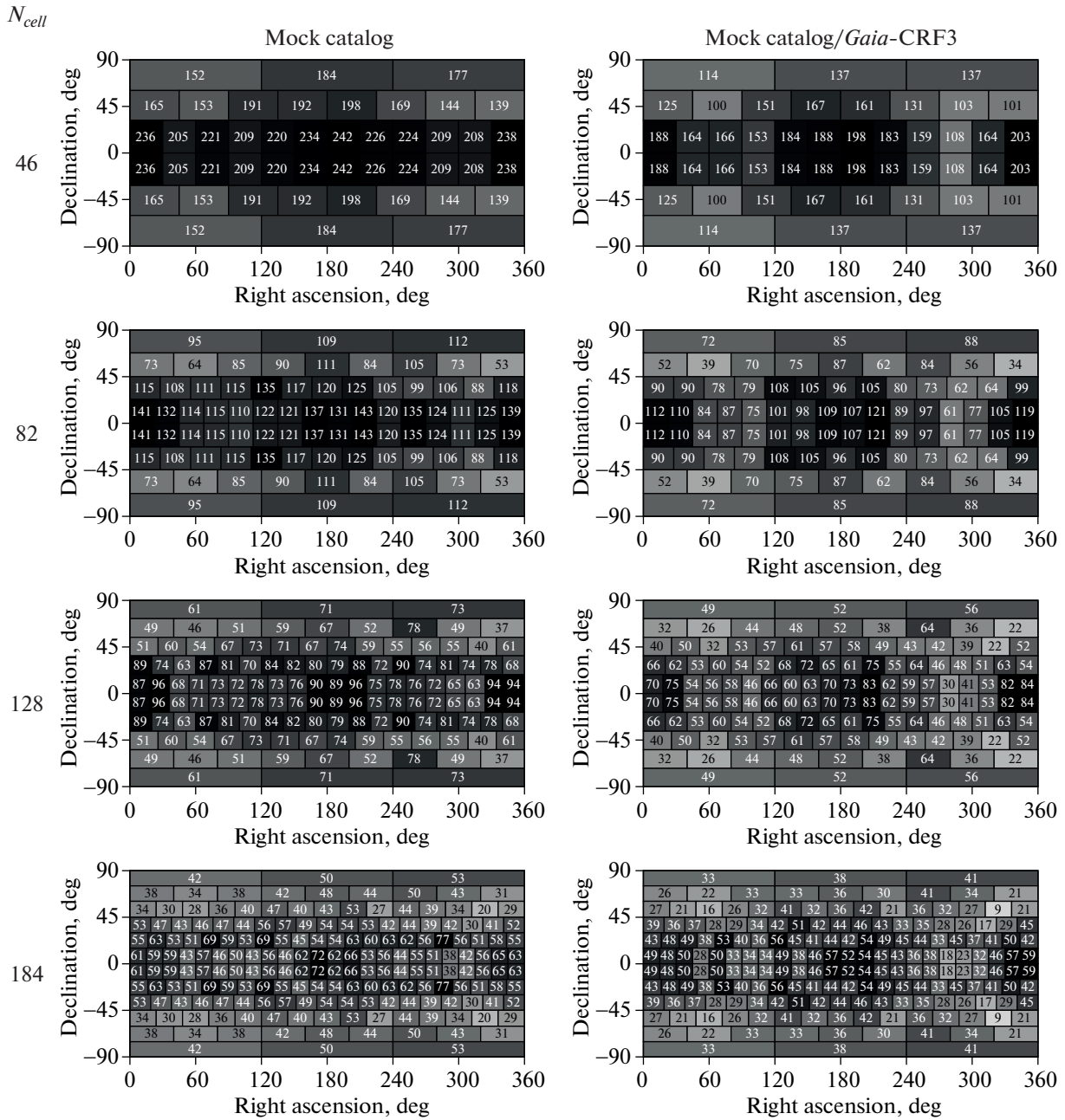


Рис. 2. Распределение по небесной сфере источников тестового каталога (левый столбец) и общих источников тестового каталога и Gaia-CRF3 (правый столбец) для разного числа ячеек равной площади на небесной сфере  $N_{cell}$ . В каждой ячейке указано число попавших в нее источников.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставляя результаты вычислений параметров взаимной ориентации каталогов ICRF3-SX и Gaia-CRF3 с использованием различных параметров сетки пикселизации и ее ориентации относительно начала координат по прямому восхождению, представленные в табл. 2 и 3, можно сделать вывод, что реальная точность параметров ориентации составляет порядка 10 мкс дуги, что

соответствует формальной ошибке параметров. Близкая величина формальных ошибок параметров ориентации была получена в [2] при сравнении каталогов ICRF3-SX и Gaia-CRF2.

С другой стороны, можно существенно улучшить точность и устойчивость (в первую очередь к неравномерному распределению источников по небесной сфере) рассматриваемого метода определения параметров взаимной ориентации ката-

логов, если вычислить параметры ориентации для нескольких случаев поворотов сетки пикселизации относительно системы экваториальных координат в различных направлениях и затем усреднить полученные результаты. Этот прием можно рассматривать как аналог метода бутстрепа, широко применяющегося в статистике, в том числе при обработке астрономических данных. При этом полученный результат останется практически свободным от влияния выбросов.

Таким образом, неравномерное распределение по небесной сфере общих источников каталогов ICRF и Gaia является основной причиной найденной (пусть небольшой и статистически незначимой) неустойчивости процедуры определения параметров взаимной ориентации между этими каталогами. При этом можно выделить две основные причины неравномерного распределения общих источников: дефицит источников в южной части неба для каталога ICRF и разрежение в области Галактического экватора в обоих каталогах. В каталоге Gaia-CRF3 практически нет источников в области Галактического экватора и в остальных областях плотность источников (число источников на квадратный градус) растет по мере приближения к полюсам Галактики [3, Fig. 4]. В каталоге ICRF разрежение источников в области Галактического экватора тоже наблюдается, но менее выражено, а в каталоге OCARS этот эффект вообще мало заметен [26, Fig. 1]. Поэтому, в частности, каталог OCARS может быть использован как источник кандидатов в ICRF для “точечного” заполнения наиболее разреженных областей в каталоге ICRF. Поскольку в этом каталоге имеются данные об оптических величинах астрометрических радиоисточников и данные идентификации радиоисточников с каталогом Gaia, это дает дополнительные возможности для выбора кандидатов в будущие источники ICRF, которые могут также усилить связь радио и оптической реализации ICRS.

Из сравнения результатов, полученных в разделе 3 по реальным каталогам и в разделе 4 по искусственным каталогам, следует, что повышение числа источников в каталоге ICRF (потому что именно оно определяет, в первую очередь, число общих источников в каталогах ICRF и Gaia) и улучшение равномерности их распределения по небу значительно повышают точность и устойчивость параметров ориентации между радио и оптическими системами отсчета. Разумеется, речь идет о радиоисточниках, доступных для наблюдений телескопом Gaia. Особенно важно добавление в ICRF новых источников в южной части небесной сферы, особенно таких, которые входят в каталог Gaia. При этом целесообразно включать в программу расширения ICRF источники, слабые в радиодиапазоне. Хотя такие источники требуют дополнительных усилий при РСДБ-набледи-

ях, они позволят, в конечном итоге, повысить качество каталога ICRF.

Для более детального выделения регионов небесной сферы, где новые источники необходимы в первую очередь, можно рекомендовать анализ распределения источников по равновеликим ячейкам сетки пикселизации SREAG. Это позволяет численно анализировать равномерность распределения источников по небесной сфере практически с любым желательным разрешением и выделять области неба, которые в первую очередь нуждаются в дополнении новыми источниками.

При построении новых версий ICRF не менее важно стремиться к равномерному распределению ошибок координат источников по небесной сфере. Для анализа соответствующих данных можно аналогично представить распределение ошибок координат источников ICRF по равновеликим ячейкам и таким образом численно проанализировать степень равномерности (неравномерности) их распределения и детального определения областей небесной сферы, где в первую очередь требуются дополнительные наблюдения источников ICRF для улучшения равномерности распределения их ошибок по небу.

Результаты, полученные в разделе 3 (табл. 2,  $N_{\text{cell}} = 82, 128$ ), имеют самостоятельный интерес, поскольку представляют, по-видимому, первое такое сравнение каталогов ICRF3 и Gaia-CRF3. Полученные результаты выявили значительные (статистически значимые) составляющие вектора взаимного поворота  $R_1$  и  $R_2$  порядка 20–25 мкс дуги. Третий компонент вектора поворота  $R_3$  и все три составляющие вектора центрального смещения  $\mathbf{G}$  оказались статистически незначимыми. Ошибки всех шести коэффициентов ориентации составили около 10–12 мкс дуги, что несколько лучше ошибок определения параметров ориентации ICRF3-SX и Gaia-CRF2, полученных в [10] (соответствующих данных для Gaia-CRF3 пока не опубликовано).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен анонимному рецензенту за полезные замечания по первоначальному варианту статьи. При подготовке статьи использовалась реферативная база SAO/NASA Astrophysics Data System<sup>3</sup> (ADS). Рисунки были подготовлены с помощью программы gnuplot<sup>4</sup>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *M. Feissel and F. Mignard*, *Astron. and Astrophys.* **331**, L33 (1998).

<sup>3</sup> <https://ui.adsabs.harvard.edu/>

<sup>4</sup> <http://www.gnuplot.info/>



2. P. Charlot, C. S. Jacobs, D. Gordon, S. Lambert, et al., *Astron. and Astrophys.* **644**, id. A159 (2020), arXiv:2010.13625 [astro-ph.GA].
3. Gaia Collaboration, S. A. Klioner, L. Lindegren, F. Mignard, J. Hernández, et al., *Astron. and Astrophys.* arXiv:2204.12574 [astro-ph.IM] (2022).
4. H. G. Walter and O. J. Sovers, *Astrometry of fundamental catalogues: the evolution from optical to radio reference frames* (Heidelberg: Springer-Verlag, 2000).
5. V. V. Vityazev, *Analysis of astrometric catalogues using spherical functions* (St. Petersburg, Russia: St. Petersburg State University, 2017).
6. F. Mignard, S. Klioner, L. Lindegren, U. Bastian, et al., *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A5 (2016), arXiv:1609.07255 [astro-ph.IM].
7. J. Frouard, M. C. Johnson, A. Fey, V. V. Makarov, and B. N. Dorland, *Astron. J.* **155**, 229 (2018), arXiv:1804.10240 [astro-ph.GA].
8. N. Liu, Z. Zhu, and J. C. Liu, *Astron. and Astrophys.* **609**, id. A19 (2018).
9. N. Liu, S. B. Lambert, and Z. Zhu, *Astron. and Astrophys.* **620**, id. A160 (2018).
10. F. Mignard, S. A. Klioner, L. Lindegren, J. Hernández, U. Bastian, and A. Bombrun, *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A14 (2018), arXiv:1804.09377 [astro-ph.GA].
11. M. Karbon and A. Nothnagel, *Astron. and Astrophys.* **630**, id. A101 (2019), arXiv:1908.11697 [astro-ph.IM].
12. V. V. Makarov, C. T. Berghea, J. Frouard, A. Fey, and H. R. Schmitt, *Astrophys. J.* **873**, id. 132 (2019), arXiv:1811.10117 [astro-ph.GA].
13. D. Mayer and J. Böhm, in *International Association of Geodesy Symposia book series* (Springer, Berlin, Heidelberg, 2020).  
[https://doi.org/10.1007/1345\\_2020\\_99](https://doi.org/10.1007/1345_2020_99)
14. N. Liu, S. B. Lambert, Z. Zhu, and J.-C. Liu, *Astron. and Astrophys.* **634**, id. A28 (2020), arXiv:1912.07396 [astro-ph.IM].
15. O. Titov and S. Lambert, *Astron. and Astrophys.* **559**, id. A95 (2013), arXiv:1310.2723 [astro-ph.IM].
16. Z. Malkin, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **506**, 5540 (2021), arXiv:2107.08967 [astro-ph.IM].
17. Z. Malkin, *Astron. J.* **158**(4), id. 158 (2019), arXiv:1909.04701 [astro-ph.IM].
18. K. M. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, B. D. Wandelt, F. K. Hansen, M. Reinecke, and M. Bartelmann, *Astrophys. J.* **622**, 759 (2005), arXiv:astro-ph/0409513.
19. R. G. Crittenden, *Astrophys. Letters and Commun.* **37**, 377 (2000), arXiv:astro-ph/9811273.
20. J. A. Kegerreis, V. R. Eke, P. Gonnet, D. G. Korycansky, R. J. Massey, M. Schaller, and L. F. A. Teodoro, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **487**, 5029 (2019), arXiv:1901.09934 [astro-ph.EP].
21. V. V. Makarov and D. W. Murphy, *Astron. J.* **134**, 367 (2007), arXiv:0705.3267 [astro-ph].
22. F. Mignard and S. Klioner, *Astron. and Astrophys.* **547**, id. A59 (2012), arXiv:1207.0025 [astro-ph.IM].
23. V. V. Vityazev and A. S. Tsvetkov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **442**, 1249 (2014).
24. S. Kopeikin and V. Makarov, *Astron. J.* **131**, 1471 (2006).
25. Z. Malkin, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **445**, 845 (2014), arXiv:1409.0504 [astro-ph.IM].
26. Z. Malkin, *Astrophys. J. Suppl.* **239**, id. 20 (2018), arXiv:1810.06029 [astro-ph.IM].