

ВТОРАЯ ВЕРСИЯ КАТАЛОГА ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ OCARS

© 2016 г. З. М. Малкин*

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
Санкт-Петербург, Россия;

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
Казанский федеральный университет, Казань, Россия

Поступила в редакцию 23.03.2016 г.; принята в печать 05.05.2016 г.

Представлена новая версия каталога оптических характеристик астрометрических радиоисточников OCARS (Optical Characteristics of Astrometric Radio Sources). Каталог включает радиоисточники, наблюдавшиеся по астрометрическим и геодезическим РСДБ-программам с 1979 г. по настоящее время, их красные смещения и фотометрические данные в 13 полосах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, а также таблицу соответствия имен объектов в OCARS и других каталогах. Основными источниками информации для каталога OCARS служат базы данных NED и SIMBAD, а также публикации в литературе и arXiv. Кроме того, организуются специальные программы наблюдений для пополнения оптических данных астрометрических радиоисточников. На момент написания статьи каталог содержал 9956 источников, из которых для 5449 имелась информация о красном смещении и для 7473 имелись фотометрические данные. Каталог обновляется в среднем раз в несколько недель и непрерывно пополняется новыми источниками и новыми оптическими данными.

DOI: 10.7868/S0004629916110037

1. ВВЕДЕНИЕ

Каталог OCARS (Optical Characteristics of Astrometric Radio Sources) содержит оптические характеристики астрометрических и геодезических радиоисточников. Он включает источники, наблюдавшиеся в астрометрических и геодезических РСДБ-программах с 1979 г., для которых приводятся, когда доступны, тип объекта, красное смещение (z) и звездные величины в визуальной и ближней инфракрасной области спектра. С момента выхода первой версии OCARS в декабре 2007 г. [1] каталог непрерывно развивается за счет увеличения числа источников, а также добавления новых и уточнения имеющихся наблюдательных данных. В настоящей работе описано текущее состояние каталога OCARS.

Первая версия OCARS была создана как источник дополнительных данных для второй версии Международной небесной системы отсчета International Celestial Reference Frame (ICRF2, [2]), работа над которой была завершена в 2009 г. Более детальное описание первой версии каталога приведено в [3].

В первое время оптические характеристики брались преимущественно из баз NED¹ и SIMBAD². NED содержит детальные данные для внегалактических источников, включая исходные измерения и комментарии. Недостатком NED является задержка в обработке литературных источников до двух и более лет. SIMBAD содержит меньше внегалактических объектов, но данные по ним, хотя и не такие детальные, как в NED, появляются более оперативно.

Следует отметить, что для пополнения информации, содержащейся в базах NED и SIMBAD, используется ограниченный круг журналов. Для охвата всех возможных источников информации и сокращения времени пополнения OCARS новейшими данными с 2011 г. отслеживается текущая литература, включая arXiv, а также используются каталоги других авторов. В первую очередь это обзор SDSS³ [4], из которого получены многие данные по красным смещениям и фотометрии. Много полезной информации на разных этапах работы было также получено из каталогов AT20G [5], RM-Redshift [6], DEEP2 [7], MASIV [8], LQAC [9],

¹ <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>

² <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

³ <http://www.sdss.org>

* E-mail: malkin@gao.spb.ru

Milliquas [10]. Хотя большинство этих данных со временем попадают в NED и SIMBAD, прямая работа с первоисточниками позволяет существенно повысить оперативность обновления OCARS, а также уточнять кросс-идентификацию объектов в разных каталогах.

Кроме использования имеющихся в литературе данных, были инициированы также специальные наблюдательные программы. Первые наблюдения по программе определения красных смещений астрометрических радиоисточников были организованы в Пулковской обсерватории [11]. В 2008–2011 гг. было выделено время для нескольких серий наблюдений на БТА-6 (САО РАН). По разным причинам, в первую очередь погодным, в результате этих наблюдений удалось определить красные смещения только для десятка объектов [11]. Намного более эффективными оказались организованные О. Титовым наблюдения на зарубежных телескопах NTT (Чили), Gemini (Гавайские острова, Чили) и NOT (Канарские острова) [12, 13]. В результате этих наблюдений были определены красные смещения для 270 радиоисточников из списка OCARS. Особенно ценно, что большая часть наблюдавшихся объектов расположена в южном полушарии, где процент радиоисточников с известными оптическими характеристиками существенно меньше, чем в северном полушарии (см. табл. 1).

Кроме спектральных наблюдений для определения красных смещений в 2015 г. совместно ГАО РАН и Парижской обсерваторией начата программа фотометрических наблюдений нескольких сотен объектов OCARS, об оптической яркости которых нет надежных данных (руководитель F. Taris, Парижская обсерватория).

При создании OCARS основной задачей было определение и коррекция ошибочных красных смещений астрометрических радиоисточников, включенных в состав дополнительных данных каталога ICRF, поскольку именно они тогда представлялись наиболее интересными для различных научных исследований [3]. Звездные величины первоначально рассматривались как второстепенные для полноты информации и планирования спектральных наблюдений.

В 2012 г. была начата работа над следующей версией международной небесной системы координат ICRF3 [14]. Планируется сравнение этого каталога координат радиоисточников с высокоточным оптическим каталогом GCRF (*Gaia* Celestial Reference Frame), полученным в результате миссии *Gaia* [15]. Для более точного сравнения необходимо иметь как можно больше источников ICRF3 в программе наблюдений *Gaia*. С этой целью в работе [16] была поставлена задача выбора радиоисточников, достаточно ярких в оптическом

диапазоне для уверенных наблюдений с *Gaia*, и интенсивных РСДБ-наблюдений для уточнения их координат в системе ICRF. Для планирования наблюдений нужно знать оптическую яркость радиоисточников, которая, таким образом, становится важной информацией для решения этой задачи. Чем для большего числа радиоисточников будет иметься информация об оптической яркости, тем больше будет выбор общих объектов для связи радио- и оптической систем координат. Поэтому полноте данных о визуальных или инфракрасных величинах в каталоге OCARS стало уделяться большое внимание. Если в первой версии каталога OCARS приводилась только одна оптическая величина в оптическом или инфракрасном диапазоне, во второй версии приводятся величины в тринадцати полосах, тех же, что использует SIMBAD. Эти детальные фотометрические данные приводятся в отдельном файле, включенном в состав второй версии OCARS с августа 2014 г.

Еще одной полезной функцией OCARS является установление взаимного соответствия объектов в разных астрометрических и астрофизических каталогах. Такое соответствие не всегда очевидно и однозначно. Для решения этой задачи в августе 2015 г. в состав OCARS был включен третий файл с таблицей кросс-идентификации объектов в разных каталогах и базах данных. В текущей версии этого файла приводится соответствие имен источников в каталогах OCARS, ICRF2 и LQAC [9], а также наблюдательных программ международной службы РСДБ для геодезии и астрометрии IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, [17]).

Вторая версия OCARS была официально представлена на Всероссийской астрометрической конференции “Пулково-2015” [18]. В настоящей работе приводится описание текущего состояния каталога.

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ КАТАЛОГА OCARS

Вторая версия каталога OCARS, в отличие от первой версии, поддерживавшейся в 2007–2015 гг., включает три файла:

`ocars.txt` — основной файл, содержащий координаты источников, их тип, красные смещения и приближенные звездные величины, а также комментарии; этот файл соответствует первой версии каталога OCARS;

`ocars_m.txt` — файл, содержащий фотометрические данные в 13 полосах uUBgVrRiIzJHK;

`ocars_n.txt` — файл, содержащий таблицу соответствия имен источников в различных каталогах; в настоящее время приводится только кросс-идентификация имен с программами IVS⁴ и каталогом LQAC [9].

Список объектов, включенных в OCARS, формируется из различных астрометрических и геодезических РСДБ-программ и каталогов в следующем порядке:

— источники, вошедшие во вторую реализацию международной небесной системы координат ICRF2 [2];

— другие источники, наблюдавшиеся в рамках наблюдательных программ IVS;

— источники из каталога РСДБ-группы Центра космических полетов им. Годдарда (НАСА)⁵;

— источники из каталога RFC⁶, который является наиболее полным астрометрическим каталогом радиисточников и обновляется ежеквартально, из него взято более половины объектов OCARS; в последней версии OCARS использована версия каталога RFC 2016a, полученная из обработки наблюдений 1980–2015 гг. по программам IVS, а также по другим радиоастрометрическим программам [19–31];

— источники из литературы.

Приближенные звездные величины в файле `ocars.txt` определяются следующим образом. Если фотометрическая информация для источника есть в файле `ocars_m.txt`, звездная величина берется из этого файла в следующем порядке предпочтения: VRrgBilzuUJHK. В противном случае (около сотни источников) используется ориентировочная величина из базы NED, приводимая без указания полосы, к которой она относится. Практика показывает, что обычно такие ориентировочные звездные величины NED относятся к полосам B или V.

В табл. 1 приведена общая статистика каталога OCARS, включая распределение объектов по трем 60-градусным зонам: северной, экваториальной и южной. Для сравнения отметим, что при равномерном распределении по небесной сфере в экваториальной зоне должно содержаться 50% источников, а в северной и южной зонах по 25% источников. Приведенная статистика ясно показывает асимметрию распределения как всех радиисточников, так и источников, имеющих информацию об оптических характеристиках, с дефицитом в южной части неба. Распределение источников OCARS по небесной сфере, приведенное на рис. 1, показывает

Таблица 1. Статистика каталога OCARS (все источники)

Число источников	9956
+30...+90	3024 (30.4%)
–30...+30	5259 (52.8%)
–90...–30	1673 (16.8%)
с известным типом	5783 (58.1%)
AGN	4292 (74.2%)
квазары	2933 (68.3%)
BL Lac	688 (16.0%)
Seyfert	400 (9.3%)
радиогалактики	1491 (25.8%)
с красным смещением (z)	5449 (54.7%)
+30...+90	1744 (32.0%)
–30...+30	3032 (55.6%)
–90...–30	673 (12.4%)
ненадежные	719 (13.2%)
с фотометрией	7473 (75.1%)
+30...+90	2280 (30.5%)
–30...+30	4002 (53.6%)
–90...–30	1191 (15.9%)
с z и фотометрией	5410 (54.3%)
+30...+90	1732 (32.0%)
–30...+30	3013 (55.7%)
–90...–30	665 (12.3%)

также дефицит источников в зоне Галактического экватора.

К ненадежным красным смещениям в табл. 1 отнесены фотометрические определения, отмеченные как ненадежные в NED и литературе, существенно разные значения в литературе для одного и того же объекта, а также величины, определенные как нижний или верхний предел возможного диапазона z . Для объектов с неоднозначными определениями z в примечаниях к OCARS приводятся найденные в литературе варианты, чтобы дать пользователю возможность вынести собственное суждение о величине и надежности красного смещения для данного источника.

⁴ <http://ivscc.gfc.nasa.gov>

⁵ <http://gemini.gsfc.nasa.gov/solutions/astro/>

⁶ <http://astrogeo.org/>

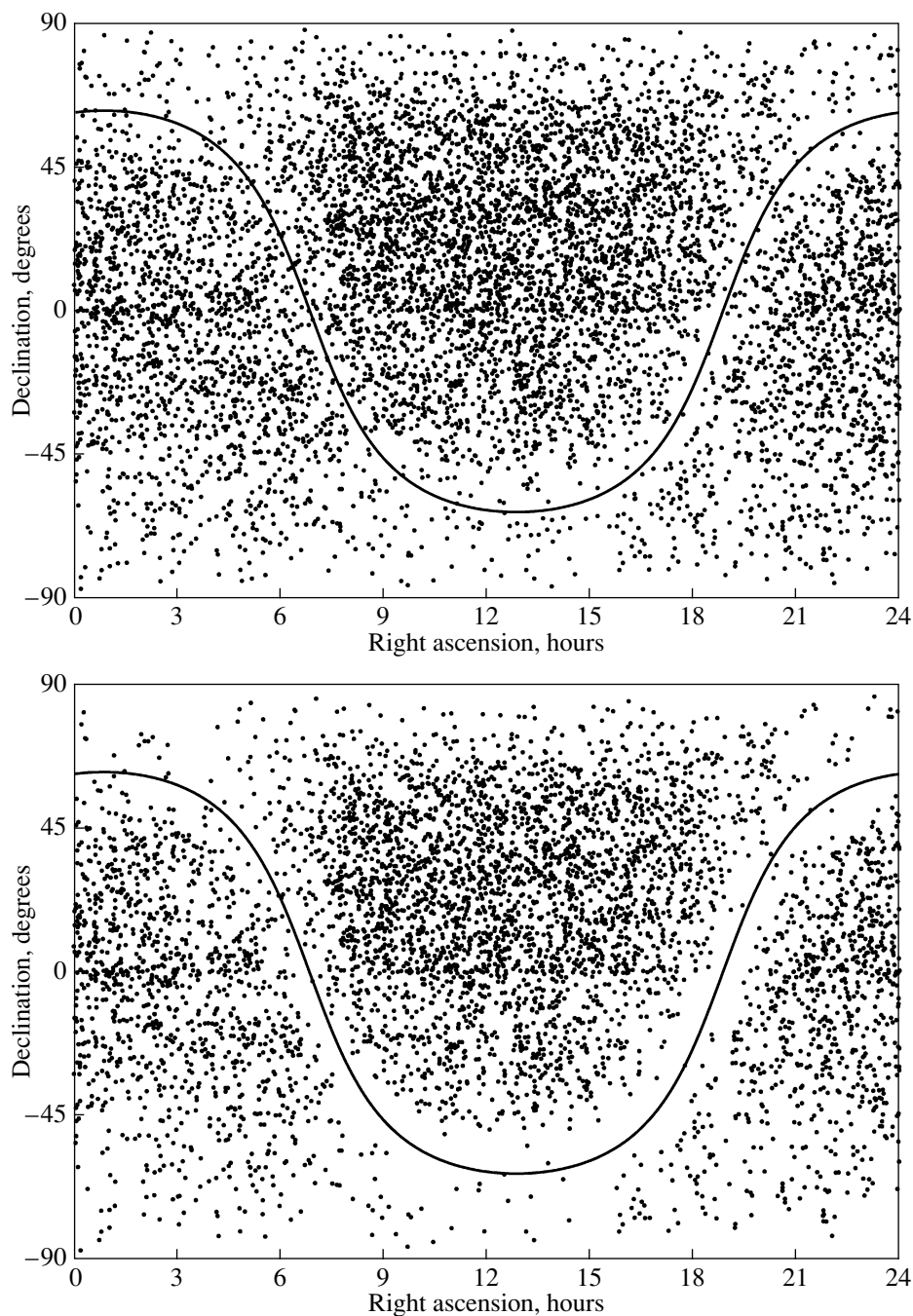


Рис. 1. Распределение по небесной сфере источников OCARS, для которых имеются фотометрические данные (вверху) и красные смещения (внизу). Линией показан галактический экватор.

Только для немногим более половины источников имеются и фотометрия, и данные о красных смещениях. В первой версии каталога 2007 г. таких источников было только 12%, потому что, как уже отмечалось выше, первоначально сбору фотометрических данных не уделялось должного внимания. Но уже в 2009 г. каталог содержал 42.0% источников с информацией о красных смещениях и фото-

метрией. Расширенные фотометрические данные, добавленные во вторую версию OCARS, подробно описаны в следующем разделе.

В табл. 2 приведена статистика источников, составляющих современную небесную систему координат ICRF2 [2]. Из таблицы видно, что данные OCARS для этих объектов более полны в смысле

Таблица 2. Статистика каталога OCARS (источники ICRF2)

Число источников	3414
+30...+90	1053 (30.8%)
-30...+30	1970 (57.7%)
-90...-30	391 (11.5%)
с известным типом	2489 (72.9%)
AGN	2251 (90.4%)
квазары	1701 (75.6%)
BL Lac	276 (12.3%)
Seyfert	180 (8.0%)
радиогалактики	238 (25.8%)
с красным смещением (z)	2401 (70.3%)
+30...+90	751 (31.3%)
-30...+30	1392 (58.0%)
-90...-30	258 (10.7%)
ненадежные	258 (10.7%)
с фотометрией	3049 (89.3%)
+30...+90	932 (30.6%)
-30...+30	1754 (57.5%)
-90...-30	363 (11.9%)
с z и фотометрией	2388 (69.9%)
+30...+90	746 (31.2%)
-30...+30	1387 (58.1%)
-90...-30	255 (10.7%)

доли источников, для которых имеется информация об их оптических характеристиках.

Распределение объектов OCARS по красным смещениям приведено на рис. 2, а на рис. 3 показано их распределение по звездным величинам. Из этих данных видно, что мода распределения оптической яркости астрометрических радиисточников равна $\sim 19^m$. Самые слабые источники в OCARS имеют величину около 25^m , но не надо забывать, что это относится лишь к оптически отождествленным источникам с измеренной оптической яркостью.

На рис. 4 показана корреляция между красным смещением и звездной величиной. Видно, что такая корреляция характерна для источников с $z < \sim 0.3$.

Для более далеких объектов зависимость практически отсутствует.

Рост со временем общего числа источников в OCARS и числа источников с известными оптическими характеристиками показан на рис. 5.

Координаты объектов OCARS получены из разных источников в следующем приоритетном порядке:

- каталог РСДБ-группы Центра космических полетов им. Годдарда ($\sim 41\%$ источников);
- каталог RFC ($\sim 58\%$ источников);
- другие данные (0.6% источников).

Каталог OCARS обновляется в среднем раз в несколько недель, всего с 2007 г. было сделано 84 обновления. История всех обновлений показана на рис. 6.

3. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Фотометрические данные в каталоге OCARS (файл `ocars_m.txt`) приводятся для тринадцати полос `uUBgVrRilzJHK`, принятых в SIMBAD. Данные для близких полос, таких как `uU`, `rR` и `iI` не объединяются, что позволяет сохранить более полную исходную информацию и обеспечить лучший контроль и выявление сомнительных данных. Только крайне малочисленные измерения в полосе `Z` объединены с полосой `z`.

Статистика фотометрических данных OCARS приведена в табл. 3. В первой части таблицы приводится число источников с данными фотометрии в этой полосе. Для наибольшего количества источников имеются измерения оптической яркости в полосе `R`. Эта полоса также близка к центральной фотометрической полосе `G` обсерватории *Gaia*, что упрощает выбор источников OCARS для связи систем ICRF и GCRF. Во второй части таблицы приведены показатели цвета (“полоса” минус `R`) для всех источников и отдельно для объектов различных типов. Данные таблицы показывают, что показатели цвета практически одинаковы для всех типов АЯГ и галактик.

Заметим, что для 47 объектов OCARS имеются фотометрические данные только в одной полосе, для 892 объектов — в двух полосах и только для 31 объекта имеется фотометрия во всех 13 полосах. У 215 источников фотометрические данные есть только в инфракрасном диапазоне (JHK). С использованием полученных показателей цвета инфракрасные величины могут быть приведены к полосе `R`, и таким образом такие источники тоже могут быть использованы при отборе объектов для связи радио- и оптической систем координат.

Для лучшего понимания фотометрических данных каталога OCARS требуются определенные

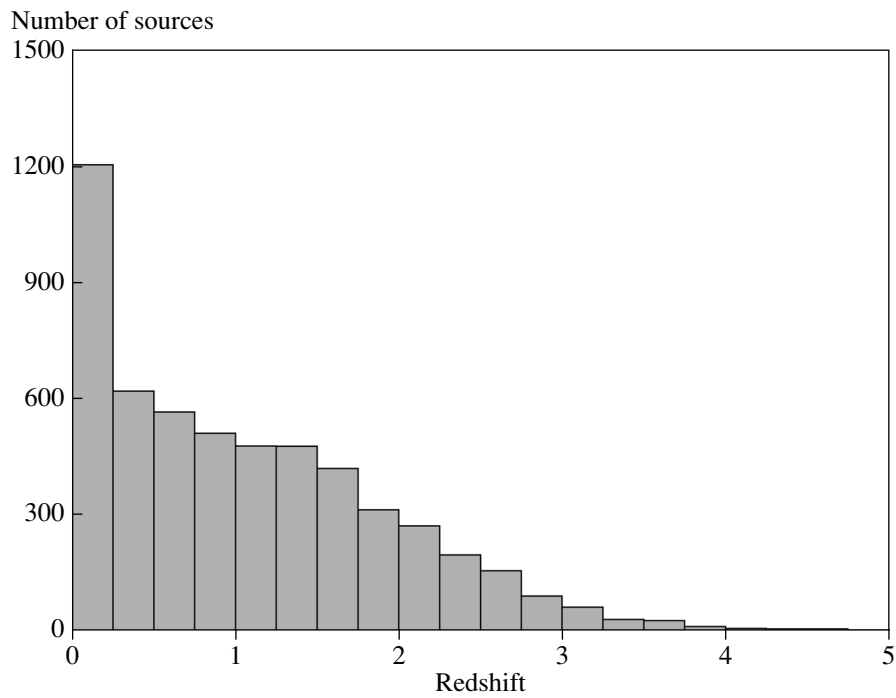


Рис. 2. Распределение источников OCARS по красным смещениям.

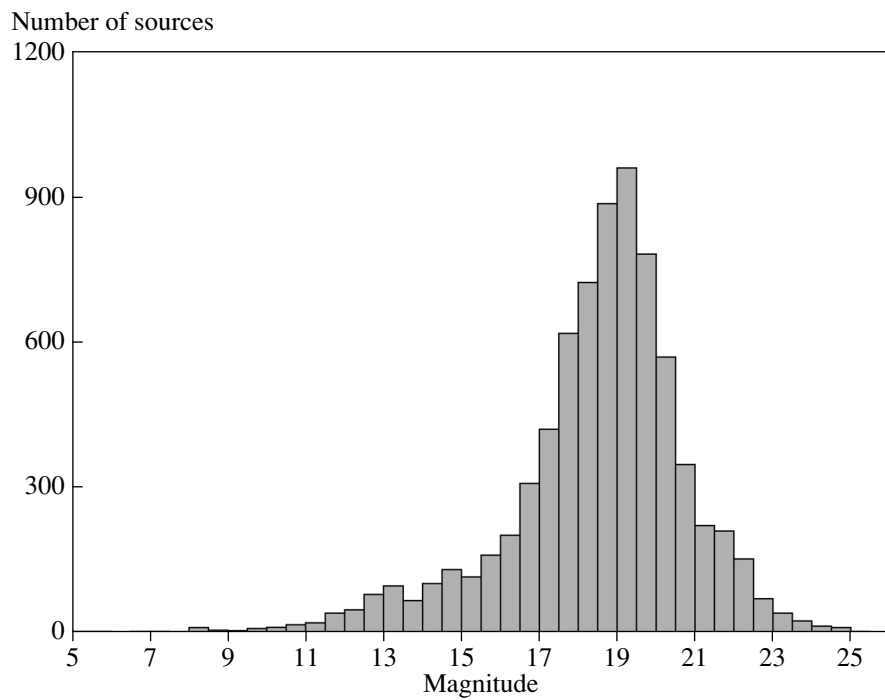


Рис. 3. Распределение источников OCARS по оптическим величинам.

пояснения. Излучение внегалактических астрометрических радиоисточников, являющихся основой современной небесной системы отсчета, формируется в основном в активных ядрах галактик

(АЯГ) и отличается, как правило, значительной переменностью в различных диапазонах длин волн. Мониторинг оптической яркости астрометрических внегалактических объектов проводился группой

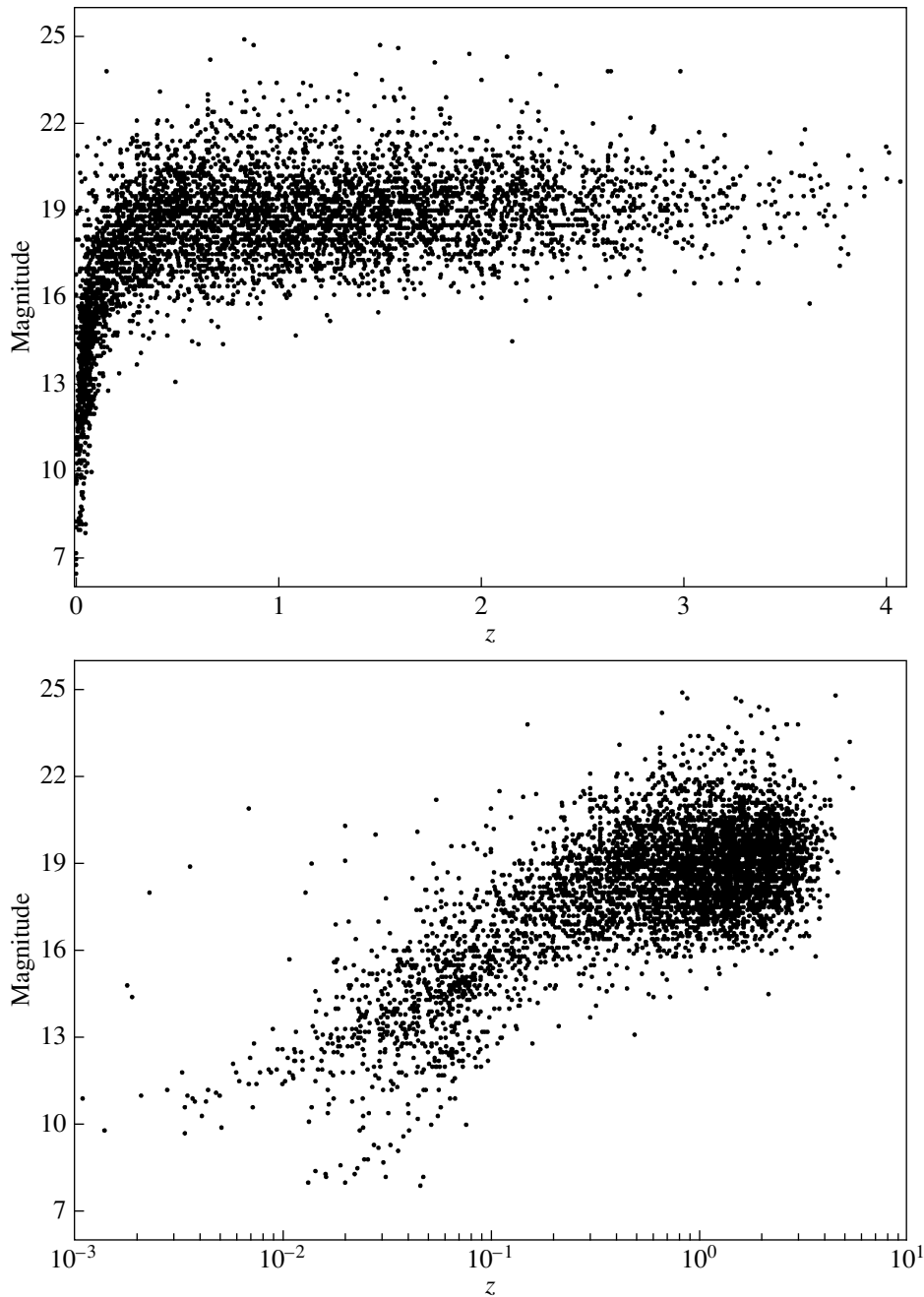


Рис. 4. Диаграмма “оптическая величина — красное смещение z ” в линейной (вверху) и логарифмической (внизу) шкале.

Тарис [32, 33]. Результаты мониторинга показали, что оптическая яркость астрометрических радиоисточников обычно меняется в пределах нескольких десятых звездной величины, но нередко размах колебаний яркости превышает одну величину и может доходить даже до трех величин, как для источника 0716+714. Правда, последний случай является, судя по всему, нетипичным. Анализ литературных данных, приводимых для источников OCARS в базе NED, также показывает, что фото-

метрические измерения блеска объекта для одной и той же полосы могут отличаться на одну звездную величину и более.

Поэтому оптические величины объектов OCARS носят до некоторой степени статистический характер. Более полным описанием оптической яркости было бы указание наблюдаемого интервала величин, но соответствующие данные доступны лишь для небольшого числа объектов. Поэтому такое расширение каталога OCARS

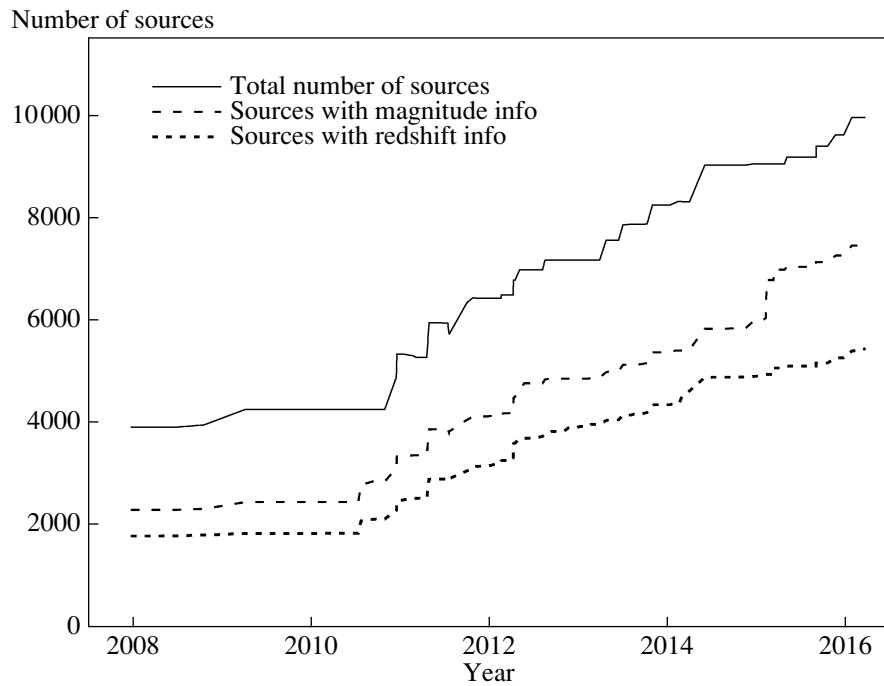


Рис. 5. Динамика роста числа источников в OCARS.

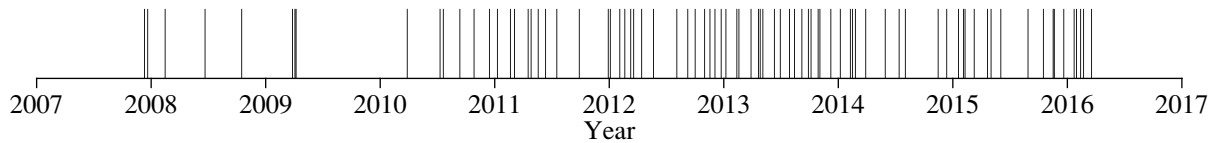


Рис. 6. История обновлений каталога OCARS.

пока только планируется. В настоящей версии каталога приводятся средние значения при наличии в литературе нескольких различных измерений в данной полосе частот.

Другой источник неопределенности в звездных величинах — неоднозначность данных обзора SDSS [4], из которого взяты величины *ugriz* для большого числа объектов OCARS. Звездные величины SDSS вычисляются по нескольким моделям⁷. Различия между значениями, полученными по разным моделям, могут достигать одной звездной величины и более. Наименьший разброс значений между моделями наблюдается для источников, близких к точечным, наибольший — для протяженных объектов, обычно галактик. В соответствии с рекомендациями авторов SDSS в OCARS используются результаты, полученные для композитной модели *cmodel*.

⁷ <http://www.sdss.org/dr12/algorithms/magnitudes/>

Надо отметить, что вблизи нескольких внегалактических радиоисточников на небе расположены яркие звезды, которые могут быть спутаны с объектами OCARS при оптических наблюдениях. Некоторые такие совпадения были впервые отмечены О. Титовым (личное сообщение). Все известные подобные случаи описаны в примечаниях к соответствующим объектам OCARS.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Знание физических характеристик как можно большего числа радиоисточников играет важную роль при решении многих астрономических задач. Каталог OCARS дополняет астрометрические каталоги радиоисточников данными оптических наблюдений о типах объектов, красных смещениях и фотометрии. Основная масса информации для каталога OCARS взята из больших астрономических баз данных NED и SIMBAD и из литературы. Значительная часть данных каталога получе-

Таблица 3. Статистика фотометрических данных и показатели цвета каталога OCARS

Полоса (F)	u	U	B	g	V	r	R	i	I	z	J	H	K
N	2532	519	6101	3702	3781	2602	6231	2655	2416	2531	3362	2896	3415
Показатель цвета ($F - R$):													
все	1.3	0.6	0.9	0.8	0.6	0.4	—	0.1	−0.6	−0.1	−1.3	−2.0	−2.7
квазары	1.3	0.6	0.9	0.8	0.6	0.4	—	0.1	−0.6	−0.1	−1.4	−2.1	−2.8
BL Lac	1.3	0.8	0.9	0.9	0.6	0.3	—	0.1	−0.5	−0.1	−1.4	−2.1	−2.8
Seyfert	1.2	0.9	0.9	0.9	0.5	0.2	—	0.0	−0.5	−0.2	−1.4	−2.2	−2.8
галактики	1.2	0.7	0.9	0.9	0.5	0.3	—	0.0	−0.5	−0.2	−1.4	−2.1	−2.7

на из специально организованных оптических наблюдений астрометрических радиоисточников. Одним из основных принципов работы над каталогом OCARS является его обновление непосредственно после появления новых наблюдательных данных. В среднем, такое обновление происходит раз в несколько недель.

Важно отметить, что сочетание высокой точности позиционных наблюдений радиоисточников методом РСДБ с известными красными смещениями позволяет построить трехмерную систему небесных координат как расширение современной сферической системы ICRF.

Во вторую версию OCARS включен отдельный файл фотометрических данных в 13 полосах видимого и ближнего инфракрасного излучения. Надежные данные об оптической яркости астрометрических радиоисточников нужны не только для общей полноты данных каталога ICRF. Они также позволяют решать различные специфические задачи, такие как отбор оптически ярких объектов для связи радио- и оптических систем координат, кросс-идентификация объектов в различных каталогах, разделение близких объектов в полях с радиоисточниками. Последняя проблема связана с тем, что нередко в районе расположения радиоисточника наблюдается несколько близких оптических объектов, и надежное отождествление одного из них с данным радиоисточником может быть непростой задачей.

Разумеется, каталог OCARS никоим образом не претендует на то, чтобы заменить большие сводные каталоги внегалактических объектов, например LQAC [9] или Milliquas [10], которые незаменимы для многих исследований. Например, одним из наиболее часто используемых источников данных для астрономических работ является каталог

LQAC-3, содержащий информацию о 321 957 квазарах. По сравнению с такими массовыми каталогами OCARS имеет более узкую сферу применения. Однако OCARS имеет важные преимущества, основными из которых являются более широкий охват используемых источников информации, более активный ручной контроль данных и постоянная поддержка в актуальном состоянии. Так, в OCARS для 1119 астрометрических радиоисточников имеется фотометрическая информация, отсутствующая в LQAC-3. У 467 источников в OCARS есть информация о красных смещениях, которой нет в LQAC-3. В результате OCARS является наиболее полным и точным каталогом оптических данных для астрометрических радиоисточников.

Каталог OCARS доступен в Интернете⁸. Для заинтересованных пользователей организовано извещение об обновлениях по электронной почте.

Дальнейшее развитие OCARS предполагается в следующих направлениях:

- включение новых радиоисточников по мере их наблюдений в астрометрических РСДБ-программах;
- включение новых оптических данных по мере их появления в литературе и проведения специальных наблюдений; по предложению В. Макарова (личное сообщение) рассматривается также расширение фотометрических данных на диапазон каталога WISE;
- расширение таблицы кросс-идентификации объектов OCARS на каталоги WISE, 2MASS, FGL и другие.

⁸ http://www.gao.spb.ru/english/as/ac_vlbi/

При этом надо отметить трудности кросс-идентификации OCARS с очень большими каталогами, связанные с нередким наличием в последних двух или нескольких объектов, близких к источнику OCARS в пределах ошибок положений. Это приводит к увеличению вероятности ложных отождествлений.

В заключение необходимо заметить, что каталог OCARS, несмотря на все принимаемые меры по проверке данных, не может быть свободен от ошибок, связанных, в первую очередь, с возможной неполнотой и неточностью данных в литературе и других астрономических каталогах и базах данных, которые служат источником информации для OCARS, а также из-за возможных ошибок кросс-идентификации объектов в радио- и оптике. Поэтому отзывы пользователей играют исключительно важную роль в исправлении этих ошибок и развитии каталога.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает свою признательность Дэвиду Гордону (David Gordon, NASA Goddard Space Flight Center), Брайану Генслеру (Bryan Gaensler) и Элизабет Махони (Elizabeth Mahony, University of Sydney), Тапио Пурсимо (Tapio Pursimo, Nordic Optical Telescope), Майклу Шоу (Michael Shaw, Stanford University), Олегу Титову (Geoscience Australia) и Вивьен Вильд (Vivienne Wild, Institute of Astrophysics, Paris) за предоставление своих данных, в том числе неопубликованных, для настоящей работы.

Автор также очень благодарен Дмитрию Блинову (Санкт-Петербургский государственный университет), Анн-Мари Гонтье (Anne-Marie Gontier, Paris Observatory), Юрию Ковалеву (Астрокосмический центр Физического ин-та им. П.Н. Лебедева РАН), Валерию Макарову (U.S. Naval Observatory), Мариону Шмитцу (Marion Schmitz, NED team, IPAC, Caltech/JPL), Жану Соше (Jean Souchay, Paris Observatory) и Олегу Титову (Geoscience Australia) за разнообразную помощь и полезные обсуждения.

В данной работе использовались NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), CDS/SIMBAD database [34], и CfA-Arizona Space Telescope Lens Survey⁹ (CASTLES), а также данные обзора SDSS.

Работа выполнена частично за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

⁹ <https://www.cfa.harvard.edu/castles/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Z. Malkin and O. Titov, in *Measuring the Future*, Proc. the Fifth IVS, St. Petersburg, Russia, March 2–6, 2008, edited by A. Finkelstein and D. Behrend, p. 183 (2008).
2. A. L. Fey, D. Gordon, C. S. Jacobs, C. Ma, R. A. Gaume, E. F. Arias, G. Bianco, D. A. Boboltz, S. Böckmann, S. L. Bolotin, P. Charlot, A. Collioud, G. Engelhardt, J. M. Gipson, A.-M. Gontier, R. Heinkelmann, S. Kurdubov, S. B. Lambert, S. O. Lytvyn, D. S. MacMillan, Z. M. Malkin, A. Nothnagel, R. Ojha, E. Skurikhina, J. R. Sokolova, J. Souchay, O. J. Sovers, V. Tesmer, O. A. Titov, G. Wang, and V. E. Zharov, *Astron. J.* **150**, 58 (2015).
3. O. Titov and Z. Malkin, *Astron. and Astrophys.* **506**, 1477 (2009).
4. S. Alam, F. D. Albareti, C. Allende Prieto, F. Anders, S. F. Anderson, T. Anderton, B. H. Andrews, E. Armengaud, É. Aubourg, S. Bailey, S. Basu, J. E. Bautista, R. L. Beaton, T. C. Beers, C. F. Bender, A. A. Berlind, F. Beutler, V. Bhardwaj, J. C. Bird, D. Bizyaev, C. H. Blake, M. R. Blanton, M. Blomqvist, J. J. Bochanski, A. S. Bolton, J. Bovy, A. Shelden Bradley, W. N. Brandt, D. E. Brauer, J. Brinkmann, P. J. Brown, J. R. Brownstein, A. Burden, E. Burtin, N. G. Busca, Z. Cai, D. Capozzi, A. Carnero Rosell, M. A. Carr, R. Carrera, K. C. Chambers, W. J. Chaplin, Y.-C. Chen, C. Chiappini, S. D. Chojnowski, C.-H. Chuang, N. Clerc, J. Comparat, K. Covey, R. A. C. Croft, A. J. Cuesta, K. Cunha, L. N. da Costa, N. Da Rio, J. R. A. Davenport, K. S. Dawson, N. De Lee, T. Delubac, R. Deshpande, S. Dhital, L. Dutra-Ferreira, T. Dwelly, A. Ealet, G. L. Ebelke, E. M. Edmondson, D. J. Eisenstein, T. Ellsworth, Y. Elsworth, C. R. Epstein, M. Eracleous, S. Escoffier, M. Esposito, M. L. Evans, X. Fan, E. Fernandez-Alvar, D. Feuillet, N. Filiz Ak, H. Finley, A. Finoguenov, K. Flaherty, S. W. Fleming, A. Font-Ribera, J. Foster, P. M. Frinchaboy, J. G. Galbraith-Frew, R. A. Garcia, D. A. Garcia-Hernández, A. E. Garcia Pérez, P. Gaulme, J. Ge, R. Génova-Santos, A. Georgakakis, L. Ghezzi, B. A. Gillespie, L. Girardi, D. Goddard, S. G. A. Gontcho, J. I. González Hernández, E. K. Grebel, P. J. Green, J. N. Grieb, N. Griesves, J. E. Gunn, H. Guo, P. Harding, S. Hasselquist, S. L. Hawley, M. Hayden, F. R. Hearty, S. Hekker, S. Ho, D. W. Hogg, K. Holley-Bockelmann, J. A. Holtzman, K. Honscheid, D. Huber, J. Huehnerhoff, I. I. Ivans, L. Jiang, J. A. Johnson, K. Kinemuchi, D. Kirkby, F. Kitaura, M. A. Klaene, G. R. Knapp, J.-P. Kneib, X. P. Koenig, C. R. Lam, T.-W. Lan, D. Lang, P. Laurent, J.-M. Le Goff, A. Leauthaud, K.-G. Lee, Y. C. Lee, T. C. Licquia, J. Liu, D. C. Long, M. Lopez-Corredoira, D. Lorenzo-Oliveira, S. Lucatello, B. Lundgren, R. H. Lupton, C. E. Mack III, S. Mahadevan, M. A. G. Maia, S. R. Majewski, E. Malanushenko, V. Malanushenko,

- A. Manchado, M. Manera, Q. Mao, C. Maraston, R. C. Marchwinski, D. Margala, S. L. Martell, M. Martig, K. L. Masters, S. Mathur, C. K. McBride, P. M. McGehee, I. D. McGreer, R. G. McMahon, B. Menard, M.-L. Menzel, A. Merloni, S. Mészáros, A. A. Miller, J. Miralda-Escude, H. Miyatake, A. D. Montero-Dorta, S. More, E. Morganson, X. Morice-Atkinson, H. L. Morrison, B. Mosser, D. Muna, A. D. Myers, K. Nandra, J. A. Newman, M. Neyrinck, D. C. Nguyen, R. C. Nichol, D. L. Nidever, P. Noterdaeme, S. E. Nuza, J. E. O'Connell, R. W. O'Connell, R. O'Connell, R. L. C. Ogando, M. D. Olmstead, A. E. Oravetz, D. J. Oravetz, K. Osumi, R. Owen, D. L. Padgett, N. Padmanabhan, M. Paegert, N. Palanque-Delabrouille, K. Pan, J. K. Parejko, I. Pâris, C. Park, P. Pattarakijwanich, M. Pellejero-Ibanez, J. Pepper, W. J. Percival, I. Pérez-Fournon, I. P'rez-Ra'fols, P. Petitjean, M. M. Pieri, M. H. Pinsonneault, G. F. Porto de Mello, F. Prada, A. Prakash, A. M. Price-Whelan, P. Protopapas, M. J. Raddick, M. Rahman, B. A. Reid, J. Rich, H.-W. Rix, A. C. Robin, C. M. Rockosi, T. S. Rodrigues, S. Rodriguez-Torres, N. A. Roe, A. J. Ross, N. P. Ross, G. Rossi, J. J. Ruan, J. A. Rubino-Martin, E. S. Rykoff, S. Salazar-Albornoz, M. Salvato, L. Samushia, A. G. Sanchez, B. Santiago, C. Sayres, R. P. Schiavon, D. J. Schlegel, S. J. Schmidt, D. P. Schneider, M. Schultheis, A. D. Schwobe, C. G. Scoccola, C. Scott, K. Sellgren, H.-J. Seo, A. Serenelli, N. Shane, Y. Shen, M. Shetrone, Y. Shu, V. Silva Aguirre, T. Sivarani, M. F. Skrutskie, A. Slosar, V. V. Smith, F. Sobreira, D. Souto, K. G. Stassun, M. Steinmetz, D. Stello, M. A. Strauss, A. Streblyanska, N. Suzuki, M. E. C. Swanson, J. C. Tan, J. Tayar, R. C. Terrien, A. R. Thakar, D. Thomas, N. Thomas, B. A. Thompson, J. L. Tinker, R. Tojeiro, N. W. Troup, M. Vargas-Magana, J. A. Vazquez, L. Verde, M. Viel, N. P. Vogt, D. A. Wake, J. Wang, B. A. Weaver, D. H. Weinberg, B. J. Weiner, M. White, J. C. Wilson, J. P. Wisniewski, W. M. Wood-Vasey, C. Ye'che, D. G. York, N. L. Zakamska, O. Zamora, G. Zasowski, I. Zehavi, G.-B. Zhao, Z. Zheng, X. Zhou, Z. Zhou, H. Zou, and G. Zhu, *Astrophys. J. Suppl.* **219**, id. 12 (2015).
5. E. K. Mahony, E. M. Sadler, S. M. Croom, R. D. Ekers, K. W. Bannister, R. Chhetri, P. J. Hancock, H. M. Johnston, M. Massardi, and T. Murphy, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **417**, 2651 (2011).
 6. A. M. Hammond, T. Robshaw, and B. M. Gaensler, arXiv:1209.1438 [astro-ph.CO] (2012).
 7. J. A. Newman, M. C. Cooper, M. Davis, S. M. Faber, A. L. Coil, P. Guhathakurta, D. C. Koo, A. C. Phillips, C. Conroy, A. A. Dutton, D. P. Finkbeiner, B. F. Gerke, D. J. Rosario, B. J. Weiner, C. N. A. Willmer, R. Yan, J. J. Harker, S. A. Kassin, N. P. Konidaris, K. Lai, D. S. Madgwick, K. G. Noeske, G. D. Wirth, A. J. Connolly, N. Kaiser, E. N. Kirby, B. C. Lemaux, L. Lin, J. M. Lotz, G. A. Luppino, C. Marinoni, D. J. Matthews, A. Metevier, and R. P. Schiavon, *Astrophys. J. Suppl.* **208**, 5 (2013).
 8. T. Pursimo, R. Ojha, D. L. Jauncey, B. J. Rickett, M. S. Dutka, J. Y. Koay, J. E. J. Lovell, H. E. Bignall, L. Kedziora-Chudczer, and J.-P. Macquart, *Astrophys. J.* **767**, 14 (2013).
 9. J. Souchay, A. H. Andrei, C. Barache, T. Kalewicz, C. Gattano, B. Coelho, F. Taris, S. Bouquillon, and O. Becker, *Astron. and Astrophys.* **583**, id.A75 (2015).
 10. E. W. Flesch, *Publ. Astron. Soc. Australia* **32**, id. e010 (2015).
 11. K. L. Maslennikov, A. V. Boldycheva, Z. M. Malkin, and O. A. Titov, *Astrophysics* **53**, 147 (2010).
 12. O. Titov, D. L. Jauncey, H. M. Johnston, R. W. Hunstead, and L. Christensen, *Astron. J.* **142**, 165 (2011).
 13. O. Titov, L. M. Stanford, H. M. Johnston, T. Pursimo, R. W. Hunstead, D. L. Jauncey, K. Maslennikov, and A. Boldycheva, *Astron. J.* **146**, id. 10 (2013).
 14. C. S. Jacobs, F. Arias, D. Boboltz, J. Boehm, S. Bolotin, G. Bourda, P. Charlot, A. de Witt, A. Fey, R. Gaume, D. Gordon, R. Heinkelmann, S. Lambert, C. Ma, Z. Malkin, A. Nothnagel, M. Seitz, E. Skurikhina, J. Souchay, and O. Titov, *AAS Meeting 223*, id.251.25 (2014).
 15. L. Lindegren, C. Babusiaux, C. Bailer-Jones, U. Bastian, A. G. A. Brown, M. Cropper, E. Høg, C. Jordi, D. Katz, F. van Leeuwen, X. Luri, F. Mignard, J. H. J. de Bruijne, and T. Prusti, in *A Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry*, edited by W. J. Jin, I. Platais, and M. A. C. Perryman, *IAU Symposium* **248**, 217 (2008).
 16. G. Bourda, P. Charlot, and J.-F. Le Campion, *Astron. and Astrophys.* **490**, 403 (2008).
 17. H. Schuh and D. Behrend, *J. Geodyn.* **61**, 68 (2012).
 18. Z. M. Malkin, *Izv. GAO Pulkovo* **223**, 49 (2016).
 19. A. J. Beasley, D. Gordon, A. B. Peck, L. Petrov, D. S. MacMillan, E. B. Fomalont, and C. Ma, *Astrophys. J. Suppl.* **141**, 13 (2002).
 20. E. B. Fomalont, L. Petrov, D. S. MacMillan, D. Gordon, and C. Ma, *Astron. J.* **126**, 2562 (2003).
 21. L. Petrov, Y. Y. Kovalev, E. Fomalont, and D. Gordon, *Astron. J.* **129**, 1163 (2005).
 22. L. Petrov, Y. Y. Kovalev, E. B. Fomalont, and D. Gordon, *Astron. J.* **131**, 1872 (2006).
 23. Y. Y. Kovalev, L. Petrov, E. B. Fomalont, and D. Gordon, *Astron. J.* **133**, 1236 (2007).
 24. L. Petrov, Y. Y. Kovalev, E. B. Fomalont, and D. Gordon, *Astron. J.* **136**, 580 (2008).
 25. L. Petrov, C. Phillips, A. Bertarini, T. Murphy, and E. M. Sadler, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **414**, 2528 (2011).
 26. L. Petrov, Y. Y. Kovalev, E. B. Fomalont, and D. Gordon, *Astron. J.* **142**, 35 (2011).

27. K. Immer, A. Brunthaler, M. J. Reid, A. Bartkiewicz, Y. K. Choi, K. M. Menten, L. Moscadelli, A. Sanna, Y. W. Wu, Y. Xu, B. Zhang, and X. W. Zheng, *Astrophys. J. Suppl.* **194**, id. 25 (2011).
28. L. Petrov and G. B. Taylor, *Astron. J.* **142**, 89 (2011).
29. L. Petrov, *Astron. J.* **142**, 105 (2011).
30. L. Petrov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **419**, 1097 (2012).
31. L. Petrov, *Astron. J.* **146**, 5 (2013).
32. F. Taris, A. Andrei, A. Klotz, F. Vachier, R. Côte, S. Bouquillon, J. Souchay, S. Lambert, S. Anton, G. Bourda, and D. Coward, *Astron. and Astrophys.* **552**, id. A98 (2013).
33. F. Taris, A. Andrei, J. Roland, A. Klotz, F. Vachier, and J. Souchay, *Astron. and Astrophys.* **587**, id. A112 (2016).
34. M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, P. Dubois, F. Bonnarel, S. Borde, F. Genova, G. Jasiewicz, S. Laloë, S. Lesteven, and R. Monier, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **143**, 9 (2000).