



## Статистика РСДБ-наблюдений по данным Международной РСДБ-службы для геодезии и астрометрии (IVS)

З. М. Малкин 

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

Поступила в редакцию 12 марта 2025 / Принята к публикации 5 апреля 2025

### Аннотация

В работе приведены избранные статистические данные, относящиеся к астрометрическим и геодезическим РСДБ-наблюдениям 1979–2023 гг., полученные из обработки архива наблюдательных данных Международной РСДБ-службы для геодезии и астрометрии (IVS). Всего за этот период времени собраны данные для 21 тысячи наблюдательных сессий, в которых получено более 25 миллионов наблюдений. Приведенная статистика позволяет проследить прогресс в развитии наблюдательных программ IVS и в точности определения параметров вращения Земли.

**Ключевые слова:** РСДБ, IVS, параметры вращения Земли

### Введение

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) является одним из основных методов исследований в астрономии и геодезии. В области фундаментальной астрометрии методом РСДБ выведена международная небесная система отсчета (International Celestial Reference Frame, ICRF) (Charlot и др., 2020), реализующая международную небесную систему координат (International Celestial Reference System, ICRS) в радио диапазоне. Метод РСДБ также является одним из ведущих методов для решения задач фундаментальной геодезии, будучи одним из трех основных методов, наряду с радиотехническими наблюдениями спутников навигационных систем и спутниковой лазерной дальнометрией, установления международной земной системой отсчета (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) (Altamimi и др., 2023). Кроме того РСДБ играет ведущую роль в определении параметров вращения Земли (ПВЗ) (Bizouard и др., 2019), которые являются параметрами преобразования между ITRF и ICRF. Таким образом, этот метод является единственным, который позволяет автономно и независимо построить взаимосвязанные земную и небесную системы отсчета и определить параметры связи между ними.

Метод РСДБ предполагает сбор данных регистрации радиосигналов с внегалактических (как правило) радиоисточников на отдельных станциях, передачу этих данных в центры корреляции, которые производят непосредственно данные наблюдений – интерферометрические задержки, определяемые для каждой пары участвовавших в наблюдениях станций, и, наконец, научный анализ наблюдательных данных. При этом редкие институты имеют технические средства и возможности проводить все три стадии: наблюдения, корреляцию и получение окончательных научных результатов. Поэтому наиболее ценный наблюдательный материал может быть получен только при широкой международной кооперации. Для лучшей организации и координации международных астрометрических и геодезических проектов в 1999 г. была организована международная РСДБ-служба для геодезии и астрометрии (International VLBI Service for Geodesy and

\*e-mail:malkin@gaoran.ru

Astrometry, IVS). Развитие этой службы за прошедшие годы можно проследить по работам (W. Schlüter и др., 2002; Wolfgang Schlüter и Dirk Behrend, 2007; Schuh и D. Behrend, 2012; Nothnagel и др., 2017). Различные материалы, относящиеся к работе IVS, можно найти на сайте IVS<sup>1</sup>.

В настоящей статье, которая является частичным продолжением на последние годы работ Малкин (2006) и Малкин (2020), приведены некоторые обновленные статистические данные, которые могут служить показателями развития наблюдательных программ IVS и результатов определения ПВЗ по этим программам.

## 1 Статистика РСДБ-данных

Одной из важных составляющих деятельности IVS является поддержка центров данных и обеспечение к ним открытого доступа для пользователей. В них также хранятся данные, полученные в рамках некоторых астрометрических и геодезических проектов, реализованных и до 1999 г. Все результаты настоящей работы получены на материале этого архива. Были обработаны данные с 3 августа 1979 г. по 31 декабря 2023 г. (результаты 2024 г. не полностью представлены в архиве IVS, потому что некоторые наблюдательные сессии требуют большого времени на корреляцию). Всего за этот период было проведено более 21 тысячи наблюдательных сессий, в которых было получено 25.9 миллионов наблюдений, из которых 21.7 миллионов оказались хорошими (удачными), то есть для них были получены уверенные РСДБ-задержки, которые являются исходными данными для последующей астрометрической и геодезической научной обработки. Остальные наблюдения были забракованы на этапе корреляционной обработки. Суммарная длительность всех сессий составила более 8500 суток. Статистика наблюдательных данных приведена на Рис. 1, эта статистика относится ко всем наблюдениям, включая предварительно отбракованные на этапе корреляции.

Наблюдения были получены на 190 станциях (формально в файлах наблюдений присутствуют 194 станции, но на 4 из них не было получено ни одного хорошего наблюдения). Всего было наблюдено 6447 источников, но для 630 не было получено ни одного хорошего наблюдения. Максимальное число хороших наблюдений, полученных в одной сессии – 33479.

Статистические данные, приведенные на Рис. 1 показывают некоторые тенденции в развитии наблюдательных программ IVS. Резкое увеличение числа сессий после примерно 2000 г. произошло, в основном, за счет коротких сессий обычно длительностью один час, называемых UT1 Intensives. Такие наблюдения регулярно проводятся с 1984 г. для оперативного определения всемирного времени. Всего в 1984–2023 гг. было проведено 13087 таких сессий суммарной длительностью около 570 суток (средняя продолжительность 1.05 часа). Если до середины 2000-х годов число таких сессий составляло в среднем около 300 в год, потом их число выросло до примерно 400 в год в 2010-х годах, а в 2020-х годах число коротких сессий резко увеличивалось ежегодно до 947 в 2023 г. В тоже время число 24-часовых сессий, которые являются стандартными для определения всех типов ПВЗ (см. следующий раздел) и установления земной и небесной систем отсчета, остается относительно стабильным после середины 1980-х годов и колеблется примерно в диапазоне 150–250 сессий в год. Нужно заметить, что, несмотря на большое число сессий Intensives, основная масса наблюдений (больше 98%) была получена в 24-часовых сессиях.

Можно заметить, что при сохранении довольно стабильного числа станций, число наблюдений заметно возросло в последние годы. Это произошло за счет увеличения числа наблюдений, приходящихся на одну сессию, чему может быть несколько причин. Происходит обновление оборудования станций и постепенная замена станций (радиотелескопов и регистрирующего оборудования) на станции нового поколения. Кроме того развиваются и методы планирования наблюдений.

Хорошо заметно и резкое увеличение числа наблюдаемых источников в конце 2010-х годов. Это связано с интенсивной подготовкой третьей версии небесной системы отсчета ICRF3.

---

<sup>1</sup><https://ivscc.gsfc.nasa.gov>

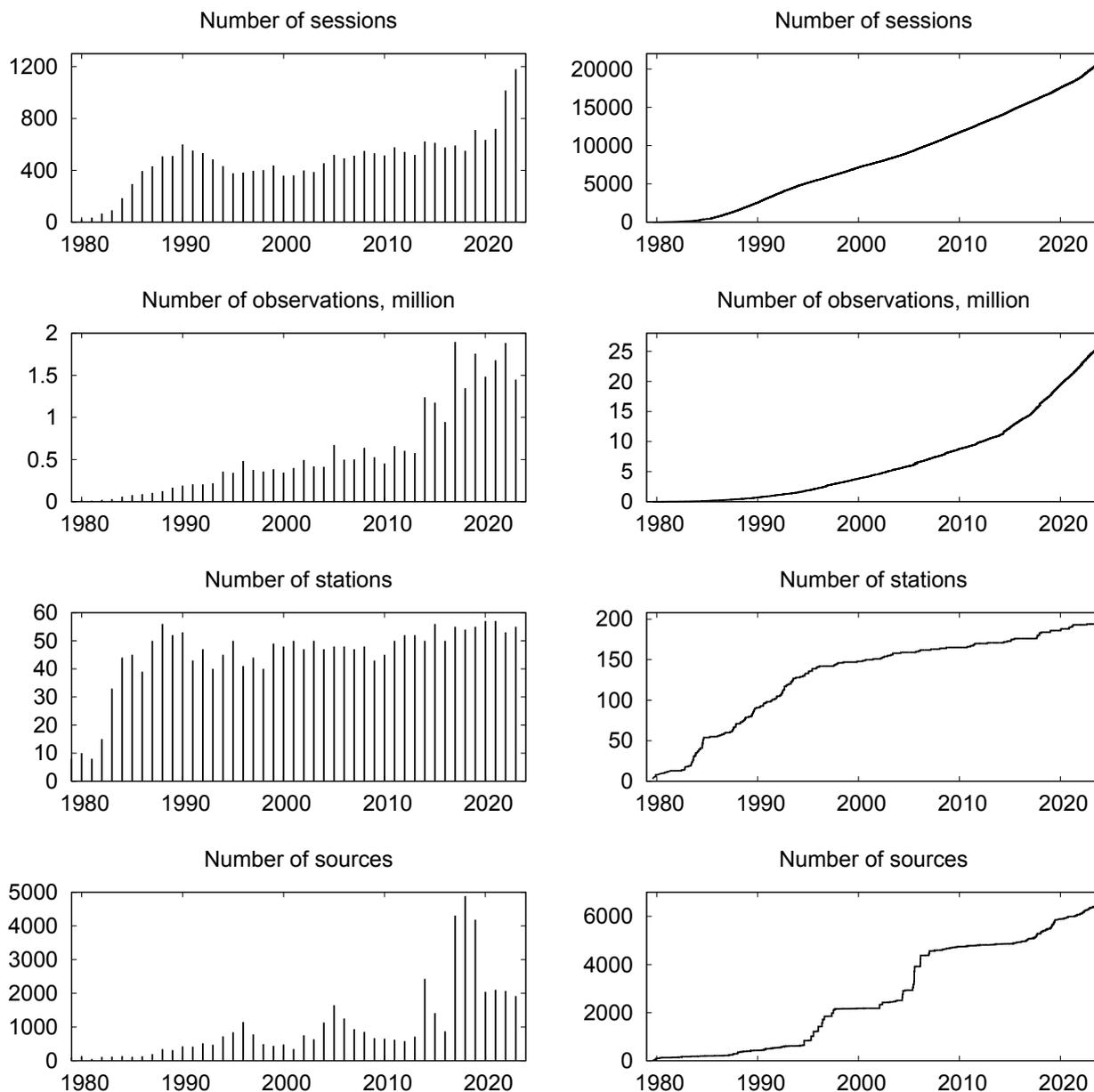


Рис. 1: Статистика наблюдений: слева данные по годам, справа – суммарные данные нарастающим количеством.

## 2 Параметры вращения Земли

Полный набор ПВЗ включает координаты земного полюса, координаты небесного полюса, всемирное время и длительность суток. В течение последних десятилетий они определяются, в основном, такими методами космической геодезии, как РСДБ, радиотехнические наблюдения спутников навигационных систем (ГНСС) и светолокационные наблюдения ИСЗ. При этом метод РСДБ является единственным, который позволяет определять все типы ПВЗ. В первую очередь следует выделить определения координат небесного полюса, которые определяются только этим методом и служат как для практических приложений, так и для уточнения теории прецессии-нутаии. Также только РСДБ позволяет определять всемирное время на длительных интервалах времени (кратковременные вариации всемирного времени могут также быть получены по наблюдениям спутников ГНСС). Определение всех типов ПВЗ по РСДБ-наблюдениям также играет важную роль в поддержании долговременной стабильности соответствующих рядов ПВЗ.

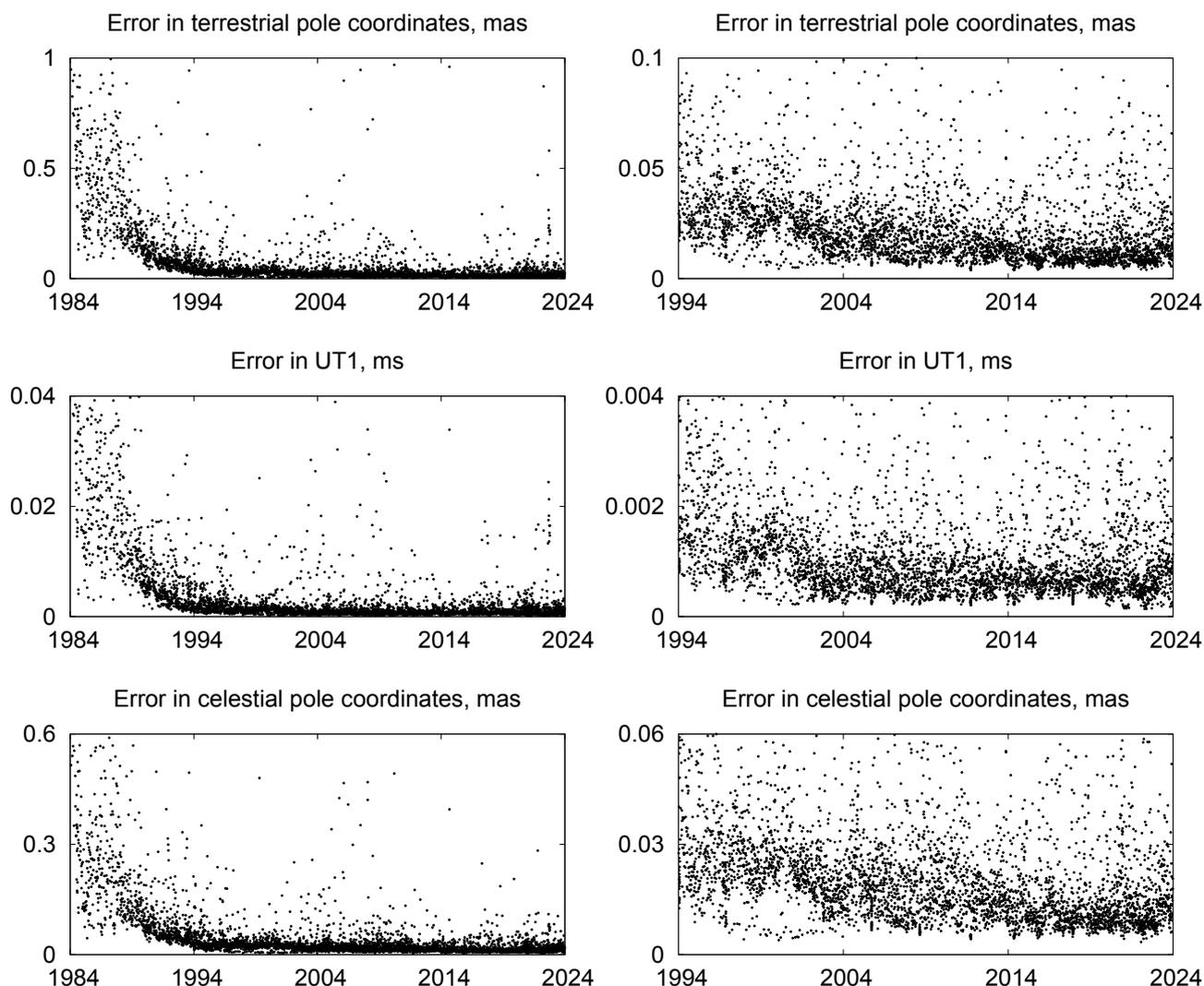


Рис. 2: Ошибки определения ПВЗ. Сверху вниз: средняя ошибка координат полюса Земли (мсд), ошибка всемирного времени (мс), средняя ошибка координат небесного полюса (мсд). Слева показаны ошибки для всего интервала данных IVS 1984–2023, справа – для последних 30 лет наиболее точных определений ПВЗ.

На Рис. 2 приведены данные об ошибках ПВЗ для отдельных 24-часовых сессий. Эти данные получены из комбинированных рядов ПВЗ IVS<sup>2</sup>. На приведенных графиках можно проследить эволюцию точности определения ПВЗ по РСДБ-наблюдениям за последние 40 лет.

Как уже отмечалось ранее (Малкин, 2020) результаты, полученные до 1990–1993 г. имеют большие ошибки. Резкое повышение точности произошло в 1993 г. и в 2002 г. после внедрения специальных наблюдательных программ для определения ПВЗ. При этом точность определения всемирного времени (UT1) почти не менялась в течение последних 20 лет, тогда как точность определения координат земного полюса и небесного полюса показало тенденцию к улучшению в 2004–2014 гг., после чего тоже практически не менялась. Небольшое увеличение ошибок ПВЗ, которое можно заметить в конце ряда, требует дополнительного анализа по мере накопления новых данных.

<sup>2</sup><ftp://ivsopar.obspm.fr/pub/ivs/vlbi/ivsproducts/eops/>

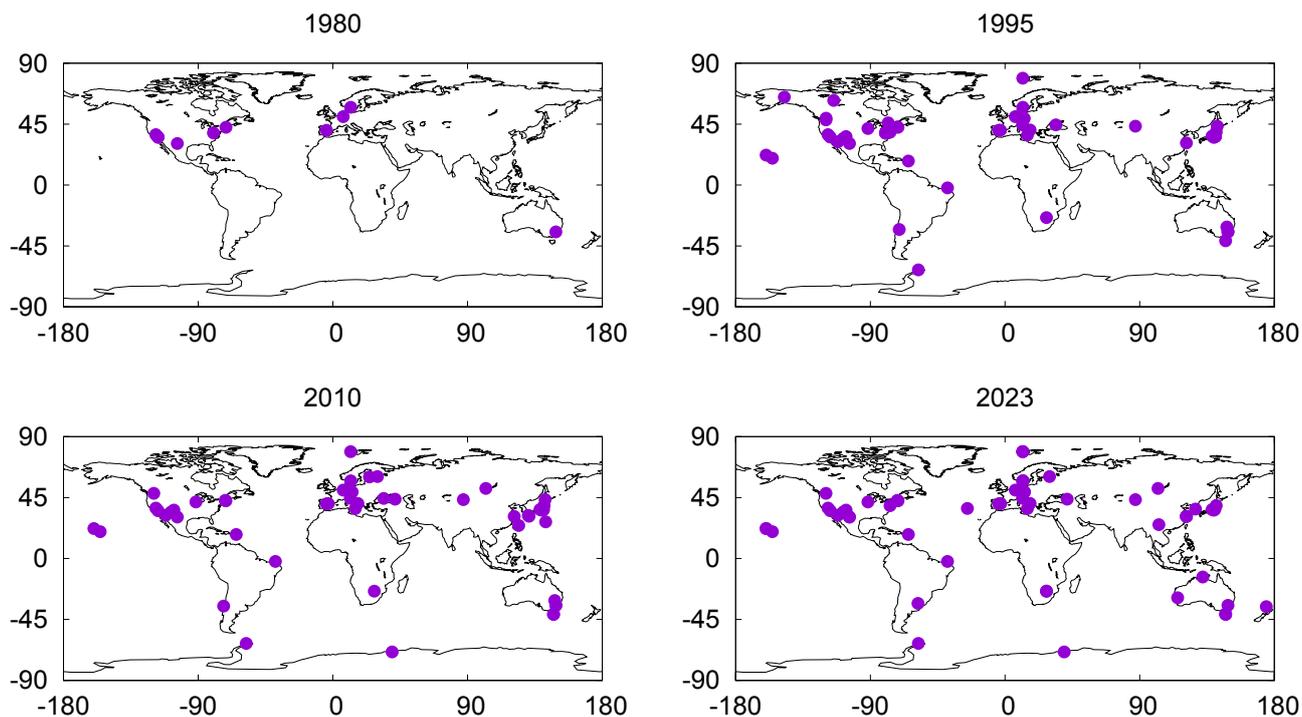


Рис. 3: Эволюция сети наблюдательных станций.

### 3 Развитие наблюдательной сети

На рис. 3 показана эволюция сети РСДБ-станций по состоянию на 1980, 1995, 2010 и 2023 гг., наблюдения которых находятся в архиве IVS. На рисунках представлены только те из них, которые работали не менее трех лет, а также станции, которые введены в строй менее трех лет назад. Естественно, за рассматриваемый период времени наблюдательная сеть не оставалась постоянной: какие-то станции вводились в строй, другие прекращали работу. Однако приведенные карты позволяют отметить общую тенденцию в развитии наблюдательной сети IVS. Наиболее важным направлением в расширении сети станций является увеличение числа южных станций, что, в первую очередь, имеет первостепенное значение для повышения точности ICRF в южном полушарии. Разумеется, расширение РСДБ-сети на южное полушарие важно также для повышения точности ПВЗ и усиления ITRF.

### 4 Заключение

Метод РСДБ является одним из базовых методов современной астрономии и геодезии. Основной международной организацией, координирующей международное сотрудничество в области астрономии и геодезии (радиоастрометрии), служит IVS. В настоящее время в работе IVS участвуют более 50 РСДБ-антенн, расположенных во многих странах всех континентов, включая Антарктиду. Наблюдения планируются в нескольких (около 5) операционных центрах, коррелируются на нескольких (около 10) корреляторах, и обрабатываются более чем в 25 центрах анализа. Согласно последнему отчету IVS<sup>3</sup> на 2022 г. в работе IVS участвовали 43 института из 22 стран.

Приведенная выше статистика показывает прогресс в развитии наблюдательных программ IVS и в точности определения ПВЗ. За счет организации новых станций и обновления оборудования на старых радиотелескопах удалось в последние годы существенно повысить число наблюдений и усилить вклад РСДБ-данных в установление земной системы координат. Резкое увеличение в последние годы числа радиоисточников с высокоточными координатами позволило

<sup>3</sup><https://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/br2021+2022/index.html>

существенно повысить точность и плотность ICRF в радио диапазоне. В то же время прогресс в повышении точности ПВЗ в течение последних 10 лет мало заметен. В целом можно сказать, что IVS успешно развивается и можно уверенно предполагать дальнейшее увеличение вклада метода РСДБ в решение научных и прикладных задач в области астрометрии, геодезии, геодинамики и вращения Земли.

## Список литературы

- Charlot, P. и др. (2020). [The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry](#). *A&A* 644, A159.
- Altamimi, Zuheir, Paul Rebischung, Xavier Collilieux, Laurent Métivier и Kristel Chanard (2023). [ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions](#). *Journal of Geodesy* 97.5, с. 47.
- Bizouard, Christian, Sébastien Lambert, César Gattano, Olivier Becker и Jean-Yves Richard (2019). [The IERS EOP 14C04 solution for Earth orientation parameters consistent with ITRF 2014](#). *Journal of Geodesy* 93.5, с. 621–633.
- Schlüter, W., E. Himwich, A. Nothnagel, N. Vandenberg и A. Whitney (2002). [IVS and its important role in the maintenance of the global reference systems](#). *Advances in Space Research* 30.2, с. 145–150.
- Schlüter, Wolfgang и Dirk Behrend (2007). [The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry \(IVS\): current capabilities and future prospects](#). *Journal of Geodesy* 81.6-8, с. 379–387.
- Schuh, H. и D. Behrend (2012). [VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry](#). *Journal of Geodynamics* 61, с. 68–80.
- Nothnagel, A., T. Artz, D. Behrend и Z. Malkin (2017). [International VLBI Service for Geodesy and Astrometry. Delivering high-quality products and embarking on observations of the next generation](#). *J. Geod.* 91.7, с. 711–721.
- Малкин, З. М. (2006). [Историческая статистика РСДБ-наблюдений](#). *Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулковке* 218, с. 397–401.
- (2020). [Статистический анализ результатов 20 лет работы Международной службы РСДБ для геодезии и астрометрии](#). *Астрон. журн.* 97.2, с. 155–176.

## Statistics of VLBI observations based on data from the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry

Z.M. Malkin 

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS

Received 12 March 2025 / Accepted 5 April 2025

### Abstract

The paper presents selected statistical data related to astrometric and geodetic VLBI observations in the period 1979–2023, obtained from processing the archive of observational data of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS). In total, data for 21 thousand observing sessions were collected during this period, in which more than 25 million observations were obtained. The presented statistics allow us to trace the progress in the development of IVS observing programs and in the accuracy of the Earth rotation parameters.

**Key words:** VLBI, IVS, Earth rotation parameters