

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ 20 ЛЕТ РАБОТЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ СЛУЖБЫ РСДБ ДЛЯ ГЕОДЕЗИИ И АСТРОМЕТРИИ

© 2020 г. З. М. Малкин^{1,2,*}

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Казанский федеральный университет, Казань, Россия

* E-mail: malkin@gaoran.ru

Поступила в редакцию 21.09.2019 г.

После доработки 22.10.2019 г.

Принята к публикации 22.10.2019 г.

В 2019 г. исполнилось 20 лет с начала работы Международной службы РСДБ для геодезии и астрономии (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS). Эта служба является наиболее крупной и авторитетной организацией, координирующей международную деятельность в своей области. В настоящее время в работе IVS участвуют около 60 радиотелескопов, расположенных во многих странах всех континентов. В центре данных IVS накоплено более 18 миллионов наблюдений, полученных в ходе более 17 тысяч наблюдательных сессий, включая более 10 тысяч коротких сессий для оперативного определения всемирного времени. В работе прослежена динамика развития IVS на основе статистической обработки накопленного в центре данных IVS массива наблюдений за 1979–2018 гг. Приводится статистика по годам наблюдений, по станциям, базам и радиоисточникам. Рассмотрена эволюция статистики наблюдений и точности результатов, получаемых из обработки РСДБ-наблюдений.

DOI: 10.31857/S0004629920020048

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных современных методов астрономических исследований является радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ). Точность этого метода достигла в наши дни микросекундного уровня, который реализуется в работах в областях астрофизики (размер и структура объектов), астрономии (абсолютные и относительные положения радиоисточников), звездной астрономии (параллаксы и движения галактических мазеров, на которых основаны, например, наиболее точные исследования вращения Галактики), небесной механики (динамика и эфемериды тел Солнечной системы, включая наблюдения космических аппаратов и радиомаяков). Астрометрические приложения РСДБ тесно примыкают к решению научных и прикладных задач в таких областях, как вращение Земли, геофизика, деформации земной коры, геодезия и навигация. Этот метод играет также исключительно важную роль в установлении небесной и земной систем координат.

Поскольку точность результатов РСДБ-наблюдений критическим образом зависит от числа и длин используемых баз между РСДБ-антеннами, наиболее интересные данные получают из

наблюдений на глобальных сетях станций. Организация таких наблюдений требует, как правило, налаженного взаимодействия между институтами разных стран. Для этого в мире организуются различные координирующие центры, одним из которых является Международная служба РСДБ для геодезии и астрономии (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS¹). В 2019 г. этой службе исполняется 20 лет, что и явилось непосредственным поводом к написанию этой статьи.

В настоящей работе не ставится задача сколько-нибудь детального рассмотрения истории радиоинтерферометрии. Тем не менее хочется отметить несколько наиболее значительных дат и этапов развития этого метода наблюдений. Первый радиоинтерферометр, так называемого морского (sea-cliff) типа, был построен в 1945–1946 гг. в Австралии [1]. Этот интерферометр состоял из одной антенны, которая наблюдала вблизи горизонта прямой и отраженный от морской поверхности радиосигнал от Солнца, и использовался для изучения солнечных пятен. Немного позже в Кэмбридже был сконструирован первый интер-

¹ <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/>

ферометр Майкельсона [2], который также использовался вначале для наблюдений Солнца. Однако уже в конце 1940-х – начале 1950-х годов были проведены первые наблюдения радиозвезд, включая определение их координат [3, 4]. Это можно считать началом эры радиоастрометрии, хотя сам этот термин появился, по-видимому, в начале 1970-х годов (самая ранняя работа с этим термином, которую удалось найти автору, датирована 1973 годом). Таким образом история радиоастрометрии насчитывает уже 70 лет!

Революционным этапом развития радиоинтерферометрии стал метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Основная идея этого метода заключается в независимой регистрации сигналов на каждой антенне вместе с метками времени от высокостабильного стандарта с последующей совместной корреляционной обработкой этих сигналов. Увлекательная история зарождения метода РСДБ описана в [5–8]. В частности, Л.И. Матвеевко вспоминает о первых обсуждениях идеи метода и возможности его практической реализации еще в феврале 1962 г. [8], хотя первая официальная публикация с изложением основ РСДБ вышла позже [9]. В статье [10] приведена краткая история развития РСДБ-работ в НАСА, в частности в Центре космических полетов имени Р. Годдарда (Goddard Space Flight Center, GSFC), который сыграл ведущую роль в создании IVS, на базе которого и в настоящее время функционируют многие ключевые элементы этой службы.

В первых практических РСДБ-экспериментах 1965–1967 гг. объектом наблюдений был Юпитер [11, 12]. Весной 1967 г. в Канаде и США были проведены первые успешные РСДБ-наблюдения внегалактических радиоисточников [13–15], что открыло дорогу к новому этапу развития радиоастрометрии на основе метода РСДБ. Применение этого метода позволило на порядки повысить точность многих астрометрических и геофизических данных и результатов, таких как небесная система координат, скорость вращения и движение полюсов Земли, прецессия и нутация, тектонические движения и региональные деформации земной коры. Нет нужды повторять здесь описание всех задач и достижений радиоастрометрии, они изложены в ряде обзорных работ, например, [16, 17], которые также сопровождаются обширной библиографией.

Точность астрономических и геодезических результатов, получаемых методом радиоастрометрии, напрямую зависит от количества и расположения антенн, образующих наблюдательную сеть. Чем больше антенн и чем больше размер сети (широтная и долготная протяженность), тем выше точность результатов. Поэтому в основных наблюдательных программах IVS участвуют стан-

ции, расположенные в разных странах и на разных континентах, включая Антарктиду. Если в первые годы развития РСДБ проводились единичные эксперименты на основе отдельных договоров между исследовательскими группами, по мере расширения этих работ в направлении мониторинга параметров вращения Земли (ПВЗ) и движения тектонических плит потребовался новый уровень организации наблюдательных программ, межинститутской и международной кооперации, а также финансового планирования. Примером такой новой организации стала начатая в 1979 г. многолетняя программа НАСА CDP (Crustal Dynamics Project) [10]. Позднее национальные РСДБ-программы и сети станций развивались и в других странах, таких как СССР/Россия [18, 19], Япония [20–22], Китай [23], Австралия [24], Италия [25].

Нужно отметить, что 1960–1970-е годы были не только временем становления астрометрической и геодезической РСДБ, они были также временем зарождения и развития других новых методов космической геодезии, таких как лазерная локация ИСЗ и Луны, и радиотехнические наблюдения ИСЗ спутниковых навигационных систем. Задачи, решаемые этими тремя методами, существенно пересекаются и включают в себя построение земной системы координат и мониторинг движений земной поверхности, а также изучение вращения Земли. Поэтому вскоре встал вопрос о координации работ по космической геодезии, включая наблюдательные программы, унификацию астрономических и геофизических моделей, используемых при анализе наблюдений, и вывод совместных комбинированных решений для ПВЗ и земной системы координат. Для решения этих задач в 1979 г. на XVII генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG) была основана комиссия по международной координации наблюдений космическими методами для геодезии и геодинамики (Coordination of Space Techniques for Geodesy and Geodynamics, CSTG). Через несколько лет были образованы три подкомиссии CSTG – GPS, SLR и VLBI, которые позже стали основой самостоятельных международных служб IGS (International GPS Service, позднее International GNSS Service), ILRS (International Laser Ranging Service) и IVS.

Основные моменты истории создания IVS можно проследить по интересной подборке архивных документов на сайте IVS². Некоторые документы и переписка, относящиеся к этому периоду, сохранились и в архиве автора. Имеющиеся материалы могут послужить вкладом в отдельную работу по истории IVS и радиоастрометрии, но

² <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/about/org/documents/index.html>

это выходит за рамки настоящей статьи. Отметим здесь только, что первое предложение о создании специальной международной РСДБ-службы было разослано подкомиссией CSTG по РСДБ 18 сентября 1997 г., а 11 февраля 1999 г. состоялось первое заседание руководящего совета IVS (IVS Directing Board). Официальное объявление о начале работы IVS последовало 1 марта 1999 г. [26]. Таким образом, организационный период создания IVS занял около полутора лет.

В последующих разделах будет прослежен прогресс в разных областях радиоастрометрии по данным и результатам IVS.

2. ОБЩАЯ СТАТИСТИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Статистический анализ, приведенный в настоящей работе, основан на массиве наблюдений, хранящихся в Центре данных IVS³. Он продолжает и расширяет аналогичную работу [27], сделанную 15 лет назад.

Для правильного понимания приведенной ниже статистики следует принять во внимание следующее. Наблюдения производятся сессиями длительностью, как правило, 24 часа или 1 час по заранее составленному расписанию. Потом наблюдения со всех телескопов поступают на коррелятор, где определяются значения собственно наблюдаемых величин – радиоинтерферометрических задержек и их производных по времени, которые затем используются для научного анализа. По разным причинам только для примерно 75% наблюдений удается получить корреляционный отклик [28]. Скоррелированные данные, включенные в выходные файлы коррелятора, имеют разное качество, и поэтому маркируются соответствующими кодами. Наблюдения, маркированные как низкокачественные, в дальнейшей обработке не используются. Анализ использованных в настоящей работе данных показывает, что доля таких наблюдений в выходных файлах коррелятора составляет 13.6%. Наконец, часть наблюдений отбраковывается во время окончательного анализа. Число последних зависит от разных причин, в том числе субъективных, и, как правило, сравнительно невелико.

Таким образом, количество наблюдений, произведенных на станциях, характеризует работу самих станций, количество скоррелированных наблюдений характеризует результативную наблюдательную работу РСДБ-сети, а количество наблюдений, использованных для получения конечного результата, характеризует научную и практическую отдачу от работы сети. В настоящей работе приведена статистика всех наблюдений, включенных в выходные файлы коррелято-

ров, за 1979–2018 гг., которые, собственно, и хранятся в центре данных IVS. Первая РСДБ-сессия, хранящаяся в архиве IVS, была проведена 3–6 августа 1979 г. на трех станциях США: HAYSTACK, NRAO 140 и OVRO 130 (здесь и далее имена станций приводятся по каталогу IVS⁴). Всего в эту статистику вошли 17 382 383 наблюдения 5453 радиостанций, произведенных на 183 станциях и 2403 базах. Суммарная продолжительность всех сессий составила более 7208 дней, или почти 20 лет непрерывных наблюдений!

Приведенные ниже данные относятся к наблюдениям в S и X диапазонах в стандарте Mark-4. В 2015 г. начала формироваться международная сеть станций, работающих по новому технологическому стандарту VLBI2010 [29]. Сначала это были две станции GGAO12M (Мэриленд, США) и WESTFORD (Массачусетс, США), на которых были отработаны новая аппаратура и технология наблюдений [30]. В 2016–2017 гг. к этой сети добавились антенны КОКЕЕ12М (Гавайи, США), WETTZ13S (одна из двух новых антенн станции Wettzell, Германия), RAEGYEB (Yebes, Испания), ISHIOKA (Ishioka, Япония) и ONSA13NE (одна из двух новых антенн станции Onsala, Швеция). За исключением станции WESTFORD, созданной на базе существующей 18-метровой антенны, для остальных станций были изготовлены новые быстрые антенны диаметром 12–13.5 м. Сеть новых станций получила название VLBI Global Observing System⁵ (VGOS). Наблюдения этой сети пока носят большей частью тестовый характер и за малым исключением не содержатся в базе данных IVS. Поэтому они в настоящей работе не учитывались. Однако можно отметить, что всего по этой программе в 2015–2018 гг. было проведено около 100 сессий длительностью от 1 до 24 часов, во время которых было получено около 500 тысяч наблюдений.

Основные научные и практические результаты радиоастрометрических наблюдений получаются на сетях, состоящих минимум из трех станций и имеющих достаточную широтную и долготную протяженность. Такие наблюдения позволяют определять весь набор астрономических и геофизических параметров, относящихся к земной и небесной системам координат, вращению Земли, движению земной коры, и других. В частности, они позволяют определять все три типа ПВЗ: координаты полюса Земли, координаты небесного полюса и всемирное время. Практически все такие наблюдения организованы в виде 24-часовых (суточных) сессий. Но эти наблюдения ресурсоемки и поэтому определения ПВЗ по суточным сессиям проводятся в последние годы в среднем

⁴ <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/stations/index.html>

⁵ <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/technology/vgos-general.html>

³ <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/vlbi/ivsdata/>

2–3 раза в неделю. Задача организации непрерывных РСДБ-наблюдений на глобальных сетях станций, в том числе для определения ПВЗ, которые исключительно важны как для изучения вращения Земли, так и для прикладных потребителей этих данных, обсуждалась неоднократно [29, 31–33] и постепенно реализуется. Прототипом таких наблюдений можно считать специальные непрерывные двухнедельные наблюдательные кампании серии CONT, которые проходили раз в три года: CONT02 (октябрь 2002, 8 станций, 49826 наблюдений), CONT05 (сентябрь 2005, 11 станций, 96 437 наблюдений), CONT08 (август 2008, 11 станций, 153 738 наблюдений), CONT11 (сентябрь 2011, 13 станций, 145 214 наблюдений), CONT14 (май 2014, 17 станций, 287 234 наблюдений), CONT17 (ноябрь–декабрь 2017, 27 станций, 372 573 наблюдений). На соответствующих графиках (см. ниже) видны скачки числа наблюдений в годы проведения кампаний CONT, особенно последних.

Надо сказать, что требования к срочности результатов определения ПВЗ по РСДБ-наблюдениям со стороны потребителей разные. Координаты полюса Земли определяются также с высокой точностью и оперативностью спутниковыми методами, в то время как метод РСДБ остается основным методом определения всемирного времени. Поскольку повышение оперативности определения всемирного времени, пусть с несколько пониженной точностью, важно для многих практических приложений, с апреля 1984 г. проводятся регулярные наблюдения в виде коротких серий на одной базе, реже на большем числе станций, которые называются UT1 Intensive. В последние годы устоялся формат таких наблюдений в виде часовых серий, хотя раньше нередко проводились и более длинные сессии. Наблюдения по программам IVS UT1 Intensive проводятся практически ежедневно, а иногда дважды в день на разных сетях. Ведутся также работы по повышению скорости обработки этих данных, в результате чего задержка получения всемирного времени может быть резко сокращена, приближаясь практически к задержке результатов, получаемых спутниковыми методами [34, 35].

Поскольку назначение и приложения суточных и часовых серий наблюдений разные, ниже наравне с суммарной приводится в подходящих случаях раздельная статистика по эти типам наблюдательных программ. При этом для исключения разночтений было принято разделение сессий на суточные и Intensive в соответствии с файлами расписаний наблюдений IVS⁶.

На рис. 1 показана динамика роста количества наблюдений, числа станций и радиоисточников

нарастающим итогом с 1979 по 2018 гг., а на рис. 2 приведена аналогичная статистика по годам. Данные рис. 1 показывают, что суммарная продолжительность наблюдательных сессий, число 24-часовых сессий и число коротких сессий растут почти равномерно, в то время как другие графики содержат некоторые интересные детали. Так, ускоренный рост числа наблюдений (рис. 1a) соответствует росту среднегодового числа наблюдений (рис. 2a). Организация многих новых станций в начале 1980-х годов в рамках программы CDP, особенно в 1982–1984 гг., отразилось в скачке числа станций на рис. 1e. Правда, многие эти станции были временными и длительных рядов наблюдений на них впоследствии получено не было. Скачки в числе источников (рис. 1f) определяются, в основном, проведением специальных программ наблюдений VLBA Calibrator Survey (VCS) на сети VLBA (США) (см. [36] и ссылки в ней).

Что касается среднегодовой статистики, представленной на рис. 2, интересно отметить, что некоторые характеристики наблюдений со временем растут, как, например, число наблюдений и среднее число наблюдений в одной сессии, а другие остаются практически постоянными или показывают колебания относительно некоторого среднего уровня на протяжении последних тридцати лет. Среднегодовые данные по числу наблюдений, приходящихся на одну станцию, детализированы на рис. 3. В целом можно, наверное, сказать, что существующая сеть станций IVS стандарта Mark-4 близка к насыщению из-за ограниченности финансирования и ресурсов наблюдательных станций и корреляторов. На решение этой проблемы направлен проект VGOS.

Интересно проследить, сколько времени потребовалось для сбора каждого миллиона наблюдений (см. табл. 1). Из приведенных данных видно, что если для накопления первого миллиона наблюдений понадобилось почти 12 лет, то в последнее время число наблюдений в архиве IVS растет в среднем более чем на миллион ежегодно, особенно в годы проведения кампаний CONT.

Изменение со временем ошибки одной радиоинтерферометрической задержки, как она определена во время корреляции, и ее скорости (производной по времени) показаны на рис. 4. Можно заметить, что ошибка определения скорости изменения задержки со временем несколько растет, что может объясняться, в первую очередь, тенденцией уменьшения длительности отдельных сканов, т.е. времени накопления сигнала при наблюдениях. Повышение чувствительности радиоинтерферометрических систем позволяет достигать заданного отношения сигнал/шум за меньшее время, что дает возможность увеличе-

⁶ <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/operafiles.html>

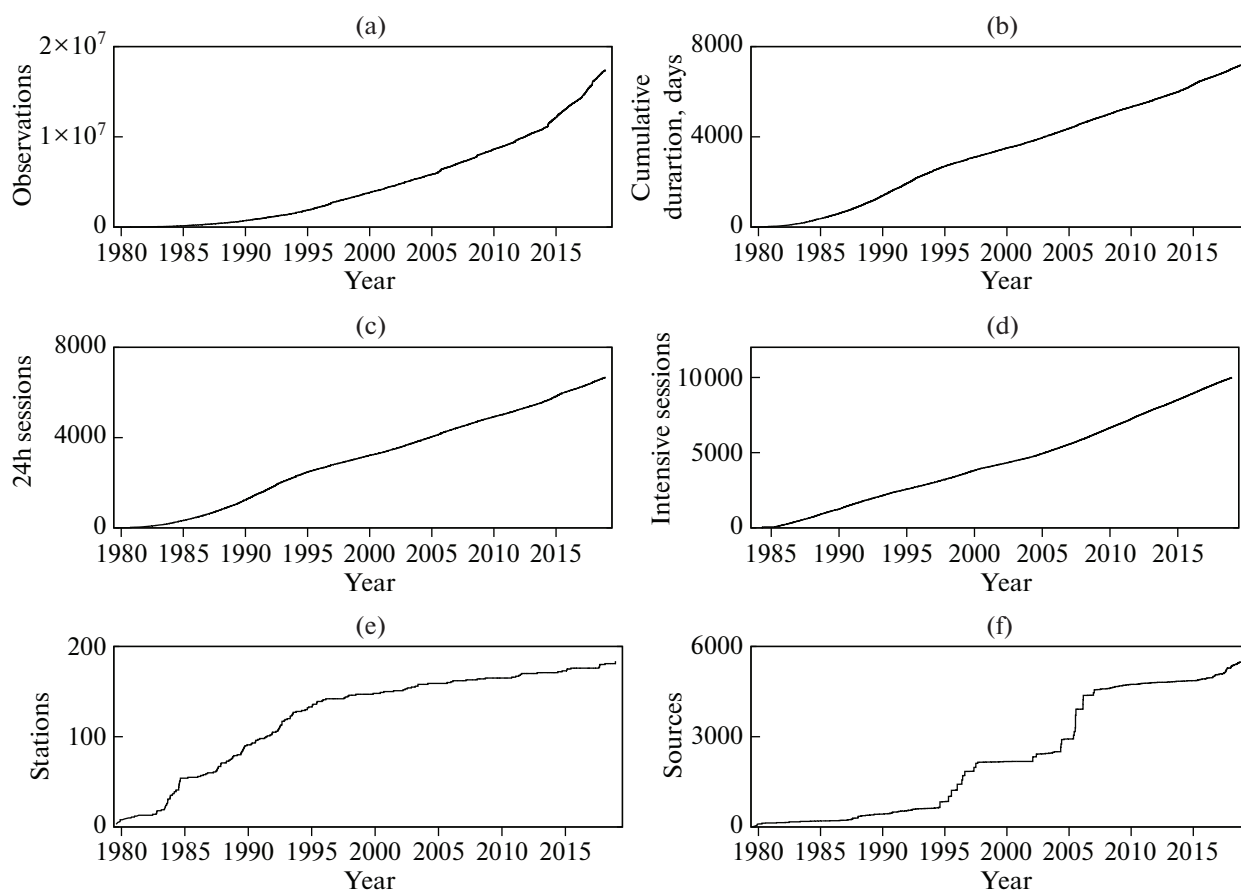


Рис. 1. Накопительная статистика наблюдательных данных IVS: a – число наблюдений, b – суммарная продолжительность наблюдательных сессий в сутках, c – число 24-часовых сессий, d – число коротких сессий UT1 Intensive, e – число станций, f – число источников.

ния числа наблюдений (см. рис. 3). Надо отметить, что в наше время для получения астрометрических, геофизических и геодезических параметров используются, в основном, задержки, но производные задержки по времени также используются для некоторых работ, например, при вычислении координат радиоисточников (см. [37]; Charlot *et al.*, готовится к публикации).

По приведенным данным ясно прослеживается возрастание среднего числа станций, участвовавших в одной 24-часовой сессии (рис. 2h). Также росло среднее число наблюдений, приходящихся на одну станцию за 24-часовую сессию (рис. 3). Эти факторы внесли большой вклад в улучшение точности определения ПВЗ за прошедшие годы (см. раздел 5).

Таблица 1. Время накопления каждого миллиона наблюдений

Миллион	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Начало	1979.6	1991.5	1995.4	1997.8	2000.4	2002.9	2005.4	2007.0	2008.8
Конец	1991.5	1995.4	1997.8	2000.4	2002.9	2005.4	2007.0	2008.8	2010.9
Число лет	11.9	3.9	2.4	2.6	2.5	2.5	1.6	1.8	2.1
Миллион	10	11	12	13	14	15	16	17	
Начало	2010.9	2012.5	2014.1	2014.9	2015.7	2016.7	2017.4	2017.9	
Конец	2012.5	2014.1	2014.9	2015.7	2016.7	2017.4	2017.9	2018.9	
Число лет	1.6	1.6	0.8	0.8	1.0	0.7	0.5	1.0	

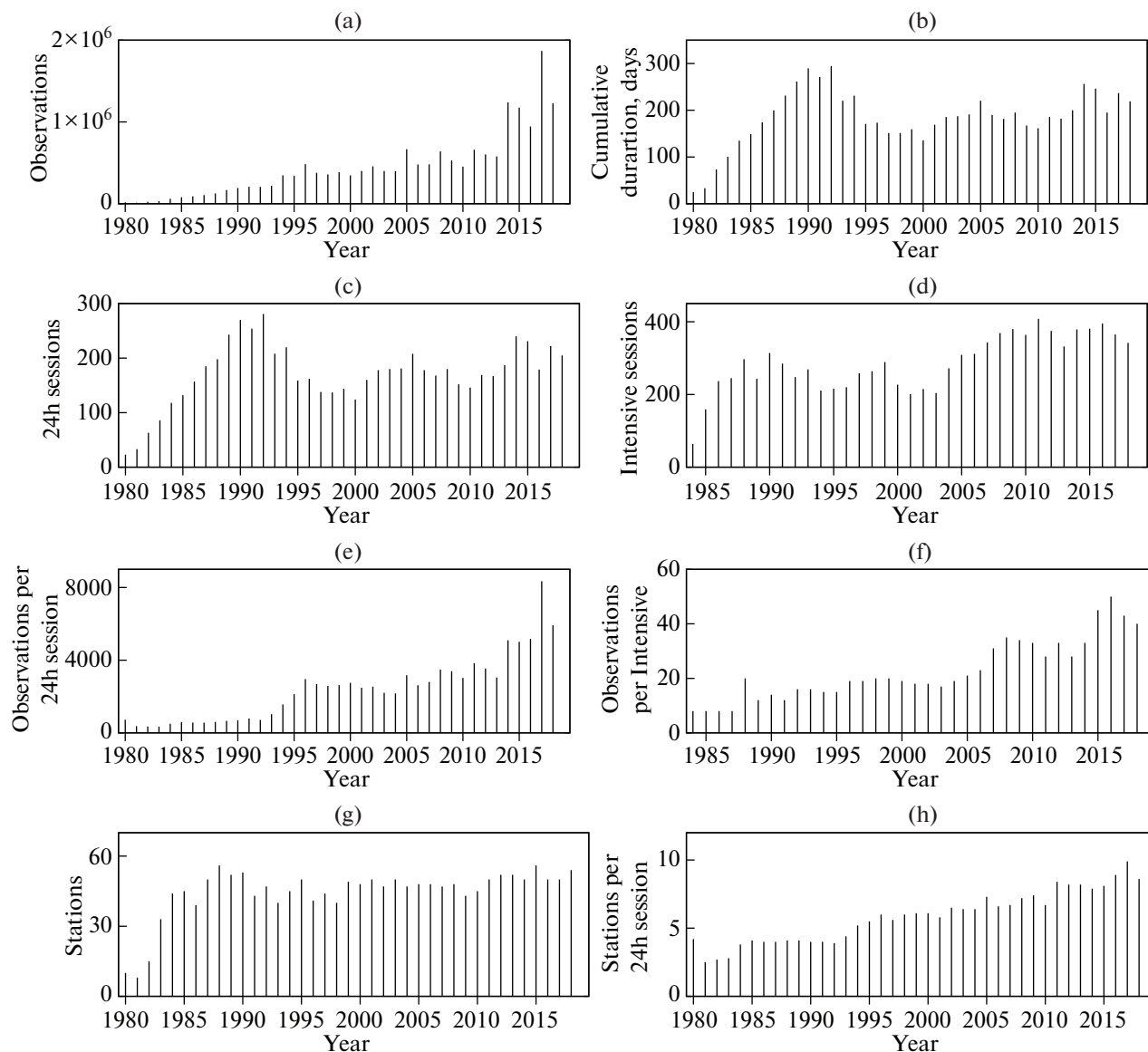


Рис. 2. Статистика наблюдательных данных по годам: а – число наблюдений, б – суммарная продолжительность наблюдательных сессий в сутках, в – число 24-часовых сессий, д – число коротких сессий, е – среднее число наблюдений в одной 24-часовой сессии, ф – среднее число наблюдений в одной сессии Intensive, г – число станций в одной 24-часовой сессии, з – среднее число станций в одной 24-часовой сессии.

Максимальное число станций в одной 24-часовой сессии составило 32 для сессии 091118ХА (УА09), специально организованной по случаю Международного года астрономии 2009. В этой же сессии было отмечено наибольшее количество баз с коррелированными данными – 493. В регулярных наблюдательных программах наибольшее число участвовавших станций было 21 (в сессии 131001ХН) и 20 (в 10 сессиях) при максимальном числе баз 188 (в 6 сессиях).

Самой длинной базой, включенной в программу наблюдений, была НАРТ15М (Южная Африка)–КОКЕЕ (Гавайи, США) длиной 12723 км, а

самыми длинными базами, на которых получены пригодные для обработки наблюдения, были SE-SHAN25 (Китай)–TIGOCONC (Чили) длиной 12660 км, HN-VLBA (северо-восток США)–YARRA12M (Австралия) длиной 12632 км и MEDICINA (Италия)–WARK12M (Новая Зеландия) длиной 12626 км.

Больше всего радиисточников (370) наблюдалось в сессии 150317ХС (VCS-II-I), а больше всего наблюдений (34 221) было получено в сессии 991220ХА.

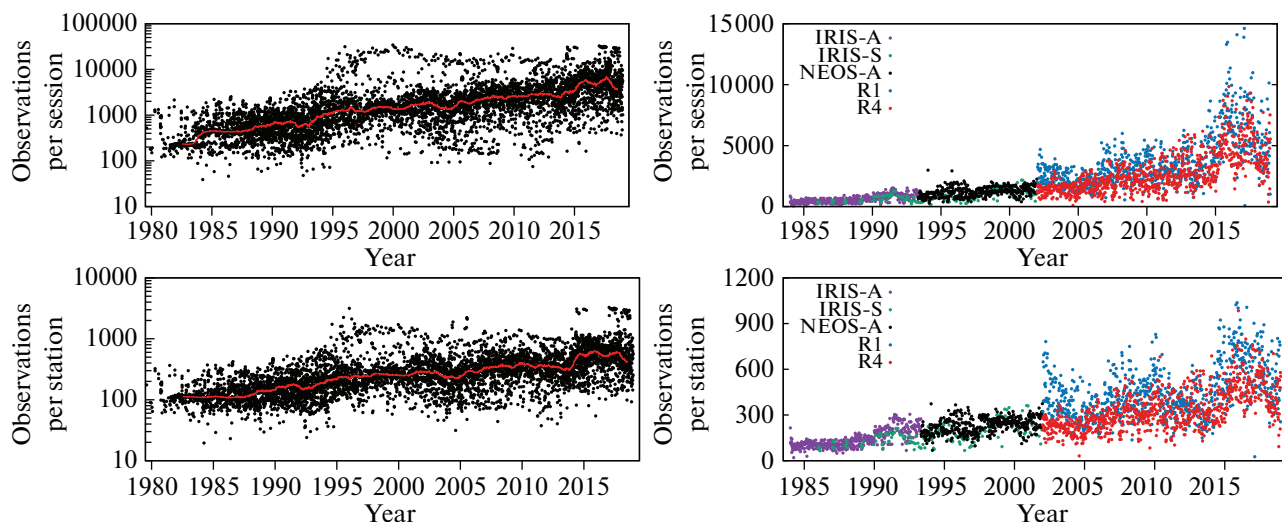


Рис. 3. Число наблюдений, приходящихся на одну сессию (верхние панели) и одну станцию (нижние панели): слева — все данные, справа — сессии основных программ определения ПВЗ. Линии на левых графиках представляют результат медианной фильтрации с шириной окна 180 суток.

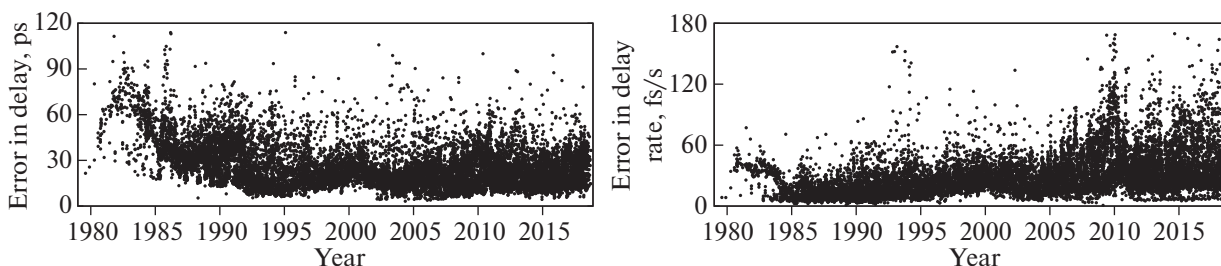


Рис. 4. Ошибка радиоинтерферометрической задержки (слева, пс) и ее производной по времени (справа, фс/с).

3. НЕБЕСНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ

Каталоги координат радиоисточников являются одним из основных и уникальных результатов радиоастрометрических наблюдений. Сама идея использования внегалактических источников для установления небесной системы координат обсуждалась, по некоторым данным, еще Лапласом и Гершелем [38]. Разумеется, речь тогда шла об оптических наблюдениях. Преимуществом построения небесной системы координат, основанной на внегалактических объектах, является отсутствие у последних заметных собственных движений на уровне точности наземных оптических наблюдений. Но хотя современная радиоастрометрия и оптическая космическая астрометрия имеют точность, достаточную для регистрации смещений положений внегалактических объектов на субмиллисекундном уровне, основанная на них небесная система координат по-прежнему является основой для астрономии и геодезии.

Потенциал РСДБ в установлении небесной системы координат, в значительной степени свободной от ошибок собственных движений и крупномасштабных систематических ошибок, был быстро признан астрометристами, и уже вскоре были высказаны первые предложения по возможной замене фундаментальной системы, задаваемой фундаментальным каталогом положений звезд (тогда FK4), на систему, определяемую по РСДБ-наблюдениям внегалактических радиоисточников [39]. Окончательно такая замена была осуществлена на 23 съезде МАС в 1997 г., который рекомендовал переход с 1 января 1998 г. с оптической системы FK5 на радиоастрономическую систему небесных координат International Celestial Reference System (ICRS) и ее реализацию — небесную систему отсчета International Celestial Reference Frame (ICRF).

Первые РСДБ-определения, проведенные в июне 1969 г., позволили определить координаты радиоисточников с точностью $1''$ – $3''$ [40]. Уже к середине 1970-х годов точность определения ко-

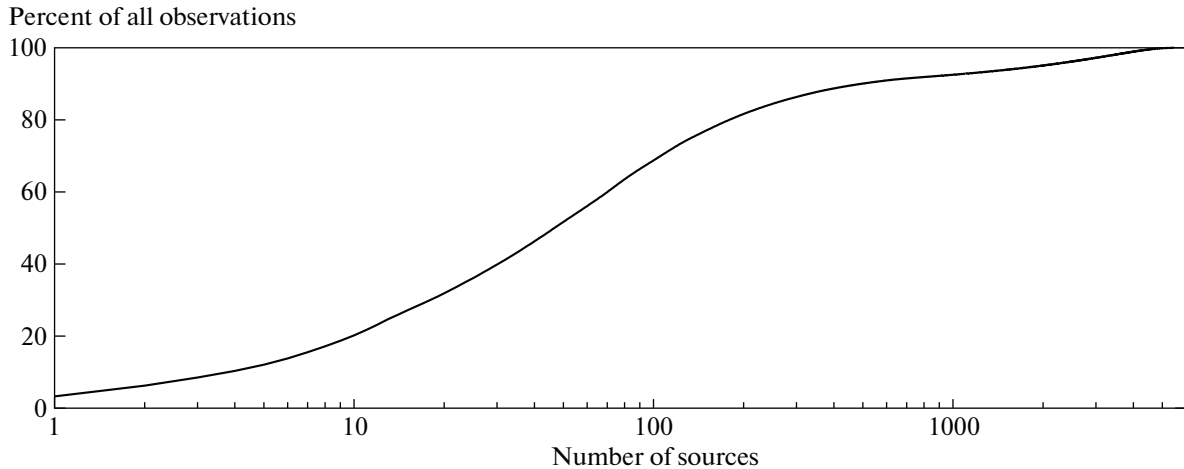


Рис. 5. Процент суммарного числа наблюдений как функция от числа источников.

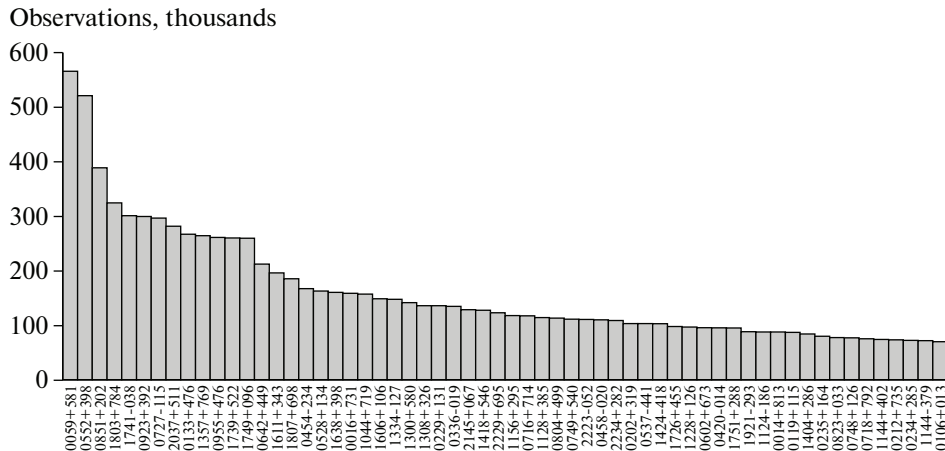


Рис. 6. Число наблюдений (в тысячах) для 60 наиболее часто наблюдавшихся радиосисточников.

ординат небесных объектов методом РСДБ сравнялась с точностью лучших оптических каталогов, полученных по наземным наблюдениям ($\approx 0.1''$), а вскоре и намного превзошла ее [41–43]. Обзор первых каталогов координат радиосисточников приведен, например, в [44–46] и цитируемых там работах.

Всего в файлах данных архива IVS за 1979–2018 гг. содержатся 5493 радиосисточника, включенных в программы наблюдений. Но для 645 из них не было получено ни одного хорошего наблюдения (пригодного для использования в окончательной обработке), а еще для 34 источников было получено только одно хорошее наблюдение. При этом 10 источников дали более 20% всех наблюдений, 47 источников дали более половины всех наблюдений, а более 90% наблюдений пришлось на 494 источника (рис. 5). На рис. 6 показано число наблюдений для 60 наибо-

лее активно наблюдавшихся источников. Для 646 источников получено не менее 1000 наблюдений и для 4844 получено не менее 100 наблюдений. Что касается хороших наблюдений, больше половины из них дали 45 источников, больше 90% – 362 источника. Для 568 источников было получено не менее 1000 хороших наблюдений, для 4209 – не менее 100 и для 4622 – не менее 30 хороших наблюдений.

Однако качество каталогов координат радиосисточников определяется не только числом включенных в них радиосисточников, но и точностью их координат. Важное значение имеют также равномерность распределения источников по небесной сфере и однородность распределения по небесной сфере ошибок координат радиосисточников. И то и другое не в полной мере присуще системе ICRF. На рис. 7 показано, что распределение наблюдений по зонам склонений остает-

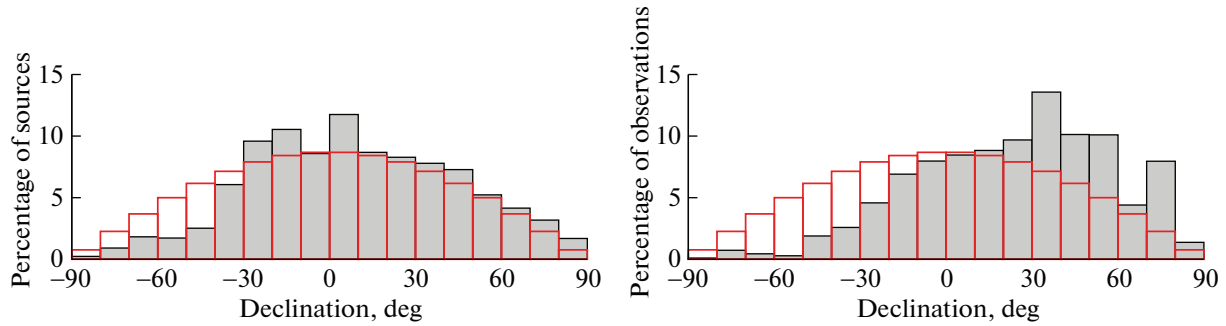


Рис. 7. Распределение числа наблюдений (слева) и числа радиоисточников (справа) по склонению в процентах от общего числа наблюдений и радиоисточников соответственно. Симметричная ступенчатая линия соответствует теоретическому равномерному распределению по небесной сфере.

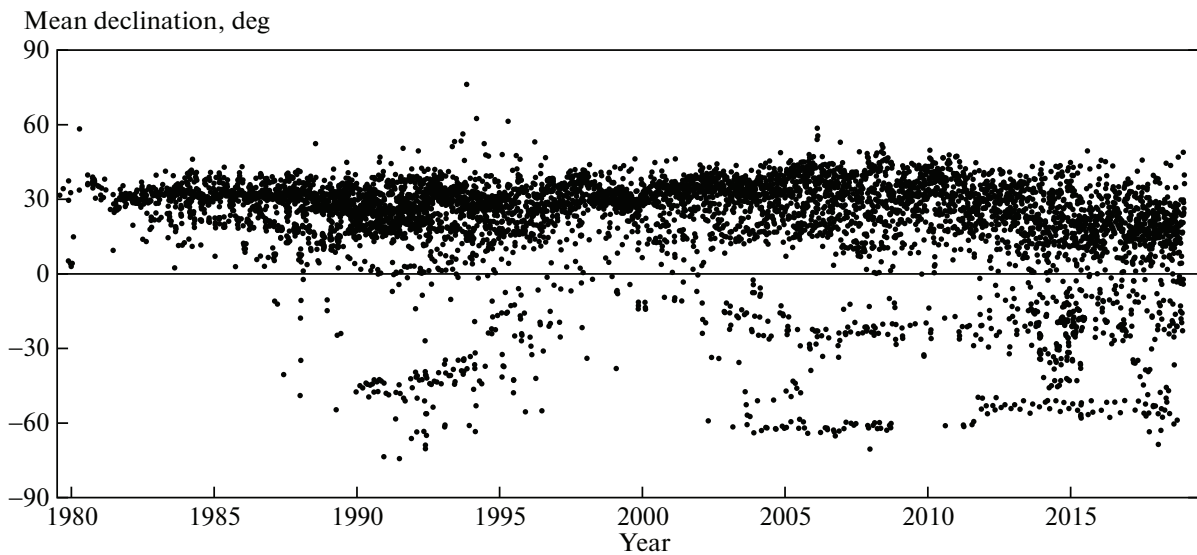


Рис. 8. Среднее склонение источников в каждой 24-часовой сессии.

ся существенно асимметричным, несмотря на предпринимаемые большие усилия по повышению наблюдательной активности в южном полушарии Земли. Эти данные также подтверждаются распределением средних склонений источников в каждой 24-часовой серии наблюдений (рис. 8). Необходимо отметить, что практическое отсутствие южных станций (южнее -43° имеются только две редко наблюдающие станции в Антарктиде) приводит к необходимости наблюдать южные источники на больших зенитных расстояниях. Это приводит к повышенной чувствительности результатов определений их склонений к ошибкам учета влияния тропосферной задержки, особенно ее зенитной асимметрии. Заметим, что для относительно малого числа наблюдений в южном полушарии существуют не только субъективные, но и объективные причины, обусловленные просто небольшой площадью и неудачной

для геодезии конфигурацией континентов в южном полушарии по сравнению с северным полушарием.

Что касается широтной асимметрии распределения ошибок координат радиоисточников, соответствующие данные представлены в табл. 2 для каталогов линии ICRF [37, 47, 48].

Изменение со временем основных параметров каталогов координат радиоисточников, таких как количество источников и ошибка определения их координат, можно проследить по каталогам, вычисленным в GSFC и Морской обсерватории США (USNO). Для этого сравнения были использованы 17 каталогов GSFC (David Gordon, личное сообщение) и 16 каталогов USNO (Alan Fey, личное сообщение), полученных в 1997–2018 гг. Эти каталоги довольно однородны, поскольку вычислены по схожей методике, хотя, конечно, существенно отличаются за счет объема исполь-

Таблица 2. Медианные ошибки координат радиисточников для каталогов линии ICRF по прямому восхождению ($\epsilon_{\alpha^*} = \epsilon_{\alpha} \cos \delta$) и склонению (ϵ_{δ}) для всего каталога и для 30-градусных зон по склонению (мсд)

δ	ICRF (S/X) 608		ICRF2 (S/X) 3414		ICRF3-S/X 4537		ICRF3-K 678		ICRF3-X/Ka 824	
	ϵ_{α^*}	ϵ_{δ}	ϵ_{α^*}	ϵ_{δ}	ϵ_{α^*}	ϵ_{δ}	ϵ_{α^*}	ϵ_{δ}	ϵ_{α^*}	ϵ_{δ}
-90...+90	0.493	0.570	0.397	0.739	0.127	0.218	0.074	0.136	0.076	0.104
-90...-60	0.735	0.950	0.297	0.362	0.204	0.267	0.315	0.344	0.138	0.162
-60...-30	1.358	1.640	0.586	1.360	0.176	0.440	0.171	0.401	0.129	0.174
-30...0	0.723	0.820	0.417	0.958	0.132	0.297	0.070	0.172	0.079	0.106
0...30	0.372	0.490	0.386	0.716	0.112	0.203	0.064	0.114	0.061	0.092
30...60	0.373	0.435	0.336	0.548	0.114	0.152	0.067	0.089	0.057	0.087
60...90	0.332	0.335	0.546	0.706	0.144	0.136	0.061	0.075	0.058	0.062

δ	Общие источники каталогов S/X					
	ICRF 601		ICRF2 601		ICRF3-S/X 601	
-90...+90	0.482	0.560	0.065	0.087	0.040	0.046
-90...-60	0.716	0.920	0.158	0.216	0.099	0.112
-60...-30	1.244	1.620	0.153	0.190	0.083	0.112
-30...0	0.715	0.795	0.065	0.091	0.037	0.044
0...30	0.372	0.490	0.058	0.076	0.036	0.043
30...60	0.373	0.430	0.056	0.065	0.038	0.043
60...90	0.324	0.330	0.051	0.054	0.034	0.034

δ	Общие источники каталогов ICRF3					
	ICRF3-S/X 600		ICRF3-K 600		ICRF3-X/Ka 600	
-90...+90	0.049	0.064	0.068	0.132	0.070	0.100
-90...-60	0.097	0.113	0.298	0.312	0.126	0.142
-60...-30	0.086	0.134	0.163	0.372	0.112	0.129
-30...0	0.061	0.103	0.068	0.159	0.078	0.105
0...30	0.039	0.045	0.059	0.110	0.061	0.092
30...60	0.038	0.043	0.063	0.083	0.057	0.087
60...90	0.033	0.033	0.054	0.068	0.058	0.062

Примечание. Для всех каталогов указаны радиодиапазоны, в которых проводились наблюдения, и число источников, использованных для вычисления ошибки.

зованных данных и улучшения со временем моделей редукции. Однако представляется, что второй фактор, в основном уточнение модели учета ошибок, вносимых тропосферой, влияет, в первую очередь, на систематику каталогов, а не на индивидуальное ошибки координат источников, которые рассматриваются в данном сравнении. Использование для данного анализа каталогов GSFC особенно интересно, потому что именно каталоги этого центра служат основой для каталогов ICRF [37, 47, 48] S/X диапазона.

Результаты сравнения приведены на рис. 9. Все результаты оказались практически одинаковыми для обоих центров. Поскольку число источников в этих каталогах со временем растет (верхняя панель рис. 9), эволюцию точности определения координат радиисточников можно надежно проследить по общим радиисточникам для всех 33 каталогов. Таких источников оказалось 385. Изменение точности их координат со временем показано на нижней панели рис. 9. Приведенные данные показывают, что ошибки определения

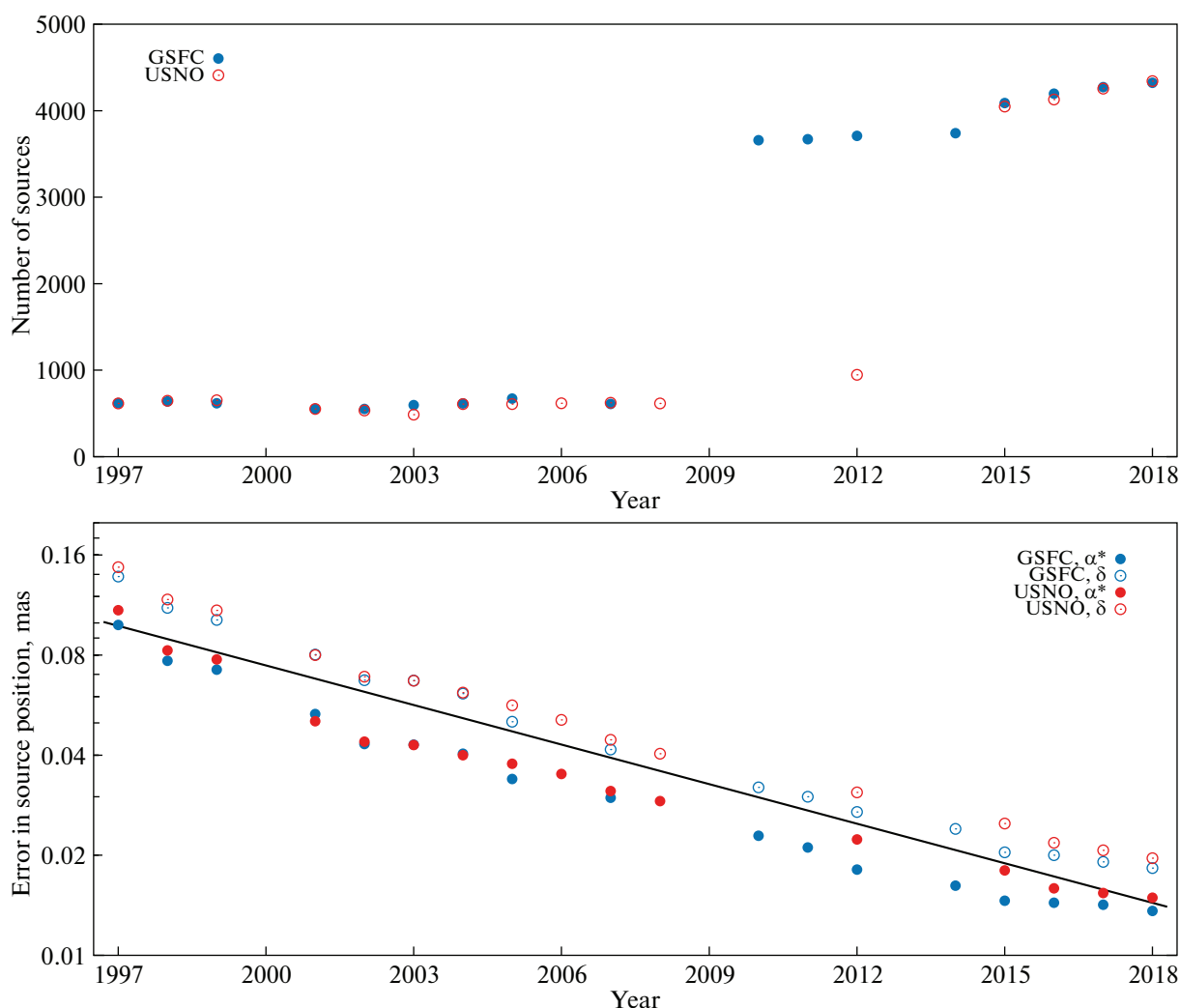


Рис. 9. Число источников (вверху) и медианные ошибки координат (внизу) для каталогов GSFC и USNO: заполненные кружки — ошибки по прямому восхождению, незаполненные кружки — ошибки по склонению. На нижнем графике — данные в логарифмической шкале.

координат убывают по степенному закону. Интересно, что это еще одно проявление степенного закона в результатах РСДБ-наблюдений, который был ранее отмечен в отношении точности определения ПВЗ [49].

В РСДБ-каталогах координат радиоисточников ошибки по прямому восхождению, как правило, меньше, чем ошибки по склонению. Основная причина этого — геометрия сети станций, в которой большинство антенн расположено в северном полушарии и соответственно большинство РСДБ-баз имеет направление, близкое к широтному.

В начальный период развития радиоастрометрии собственные движения радиоисточников считались пренебрежимо малыми, поскольку они на порядки меньше собственных движений звезд, которые формировали в то время небесную си-

стему координат. Однако по мере повышения точности определения координат радиоисточников по одной сессии до субмиллисекундного уровня их систематические смещения стали вполне заметными. Этот эффект со временем становится еще более существенным по мере дальнейшего повышения точности наблюдений и анализа. В настоящее время эти смещения интерпретируются в рамках разных моделей, таких как переменная структура радиоисточников, космологические модели, влияние галактоцентрического ускорения Солнечной системы. Далекое не все наблюдаемые данные могут быть уверенно объяснены в рамках этих моделей, а надежность этих данных для конкретного источника зависит как от числа его наблюдений, так и от их длительности. На конец 2018 г. 4356 источников наблюдались более пяти лет, 4169 более 10 лет, 2106 бо-

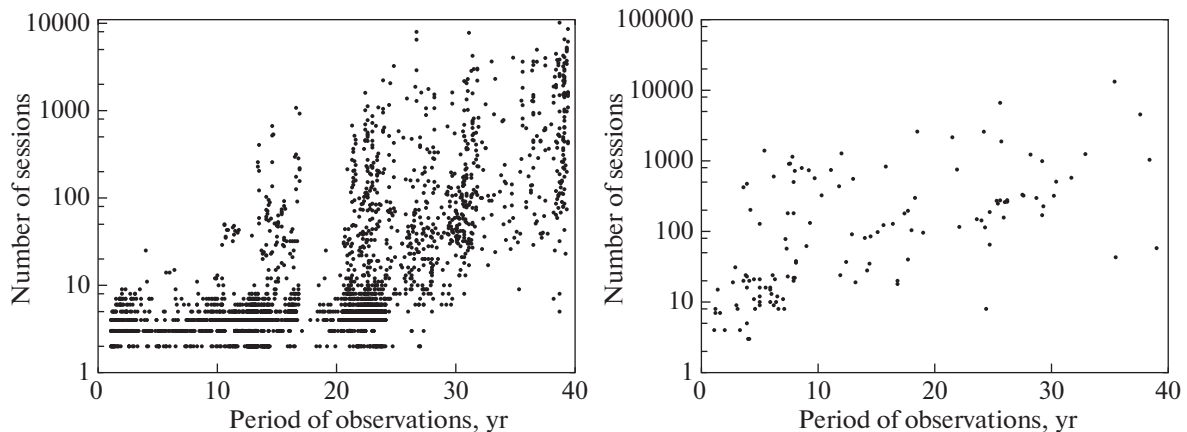


Рис. 10. Соотношение периода наблюдений и числа сессий для источников (слева) и станций (справа).

лее 20 лет, 372 источника наблюдались более 30 лет. При этом длительный период наблюдений не обязательно соответствует плотному ряду наблюдений, что необходимо для надежной оценки стабильности положения источника. Как видно из рис. 10 (левый график), многие источники при длительности периода наблюдений 20, 30 и более лет имеют оценки их координат всего для двух или нескольких эпох, чего, конечно, недостаточно для изучения особенностей их видимого движения (источники, наблюдавшиеся только в одной сессии, на рисунке не представлены).

4. ЗЕМНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ И ГЕОДИНАМИКА

Внедрение в геодезию метода РСДБ позволило проводить регулярные высокоточные измерения длин баз между станциями, в том числе межконтинентальных баз, что, в частности, позволило впервые уверенно обнаружить взаимные движения тектонических плит и региональные деформации земной коры [10, 50–52]. В частности, в середине 1980-х годов были впервые зафиксированы взаимные движения РСДБ-станций в Калифорнии, США [53]. В настоящее время этот метод играет важную роль при установлении земной системы координат, в первую очередь ее масштаба и поля скоростей.

Всего в программах IVS в 1979–2018 гг. принимали участие 183 станции. При этом под станцией следует понимать некоторую точку на поверхности Земли, координаты которой определяются. Этой точкой может быть характерная точка радиоантенны, обычно пересечение осей, или геодезический маркер, связанный с земной поверхностью. Первое характерно для стационарных антенн, а второе для передвижных. Совокупность этих точек образует земную систему отсчета.

Для построения земной системы отсчета необходимо знать как координаты, так и скорости станций. Однако часть из них наблюдали короткое время, недостаточное для надежного определения их скорости. На конец 2018 г. 122 станции наблюдали больше 2.5 лет. Такая минимальная длительность наблюдений рекомендуется при построении глобальных земных систем координат методами космической геодезии, чтобы достаточно надежно разделить линейный тренд в движении станции (собственно, ее скорость) и сезонные вариации в движении станции [54–56]. Однако и РСДБ-станции с более коротким периодом наблюдений часто включаются в каталог ITRF, если в этом же месте достаточно долго работала станция, наблюдавшая другим методом. Но, разумеется, желателен более длительный период РСДБ-наблюдений для более надежного определения скорости станции и сезонных вариаций ее координат, которые включены в последнюю версию ITRF, ITRF2014 (International Terrestrial Reference Frame [55]). На конец 2018 г. 103 станции работали в сети IVS больше пяти лет, 62 больше 10 лет, 36 больше 20 лет, 9 станций наблюдали больше 30 лет. Длительность периода наблюдений для станций, наблюдавших не менее пяти лет, показана на рис. 11. При этом для надежного определения скорости станций и изучения ее возможного нелинейного движения важна также плотность наблюдений. Данные рис. 11 (правый график) показывают, что нет прямой зависимости между длительностью и плотностью рядов координат станций, но корреляция между этими параметрами существенно выше, чем для источников (станции, наблюдавшие только в одной сессии, на рисунке не представлены).

Как и в случае радиоисточников, общее число наблюдений IVS распределяется между станциями неравномерно. Три станции (WETTZELL, NYALES20 и KOKEE) дали вместе больше 20% на-

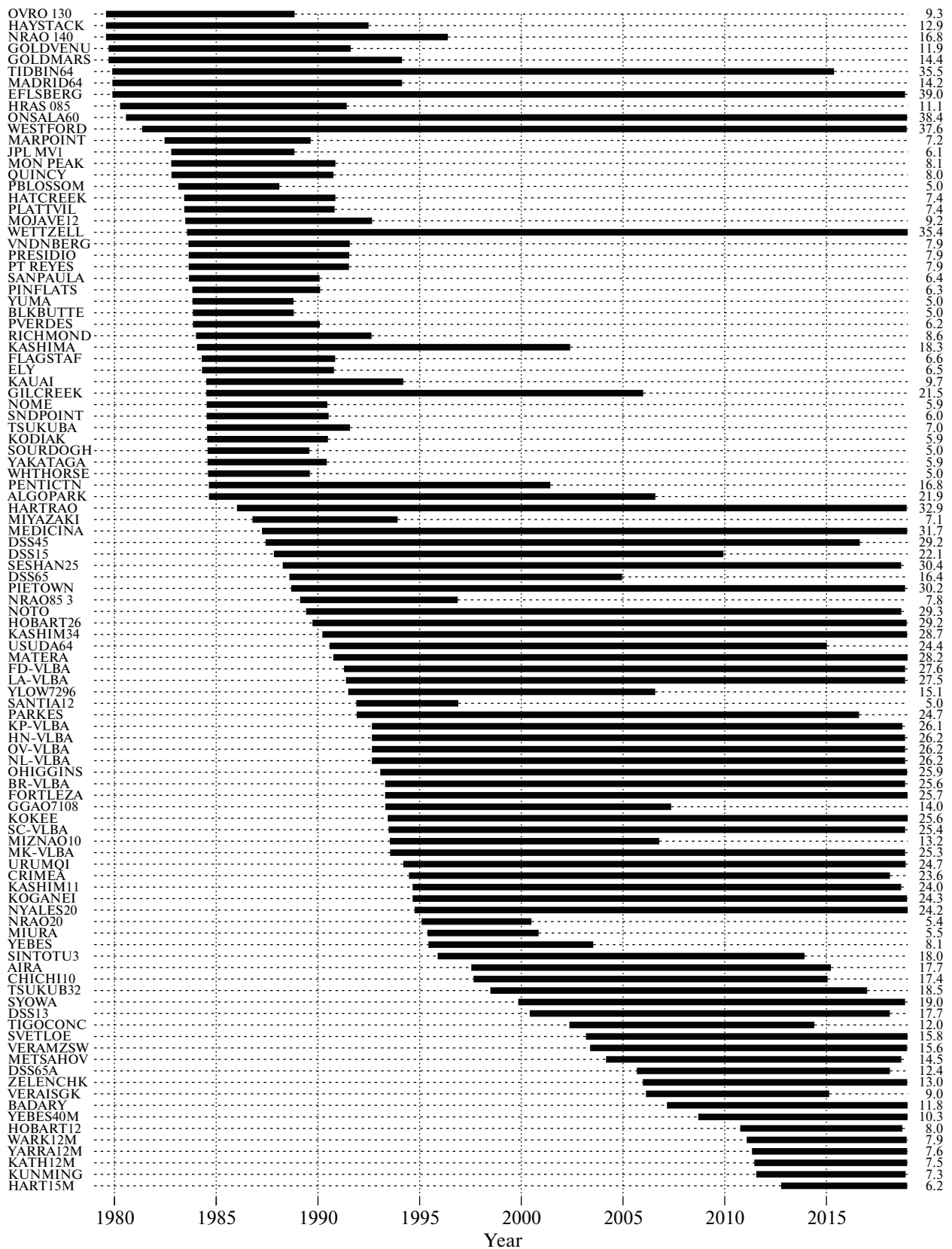


Рис. 11. Периоды работы станций, работавших в сети IVS не менее пяти лет. Справа указан период наблюдений в годах. Станции отсортированы по начальной дате работы в сети IVS.

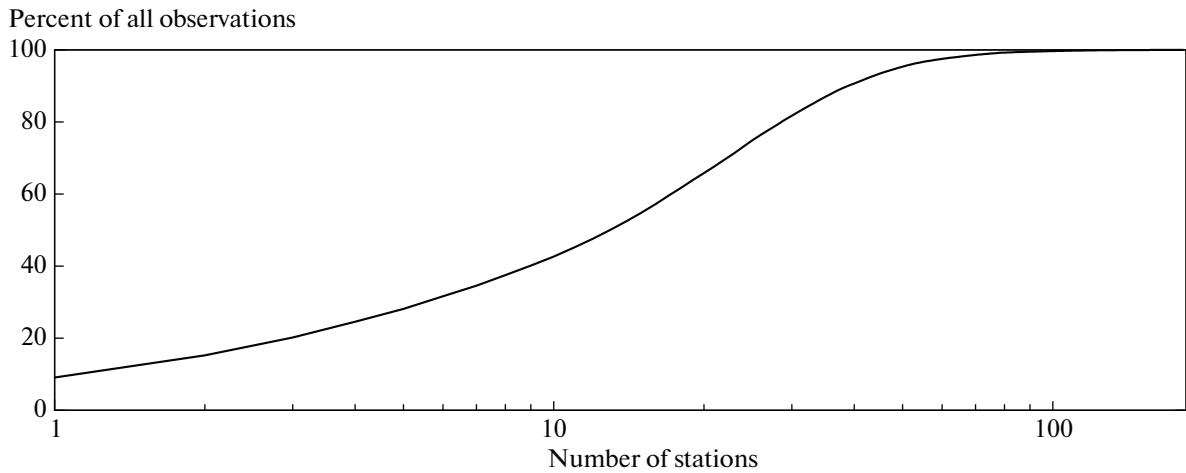


Рис. 12. Процент суммарного числа наблюдений как функция от числа станций.

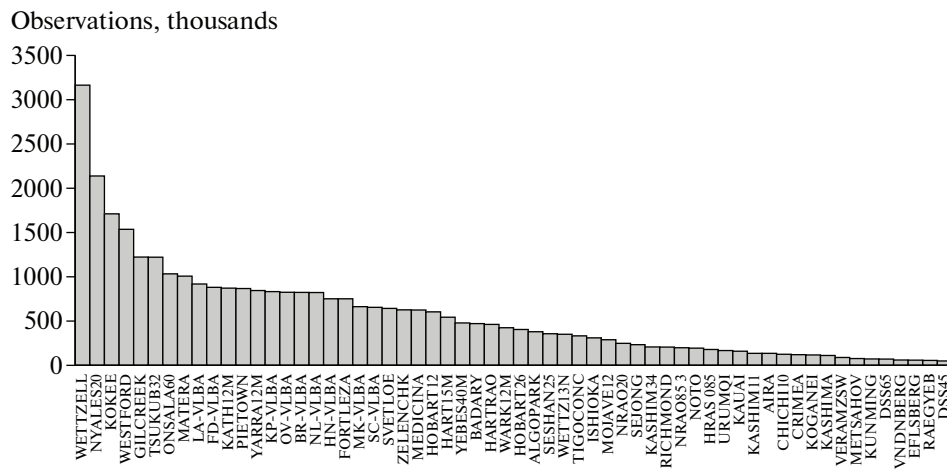


Рис. 13. Число наблюдений (в тысячах), полученных на 60 наиболее активных станциях.

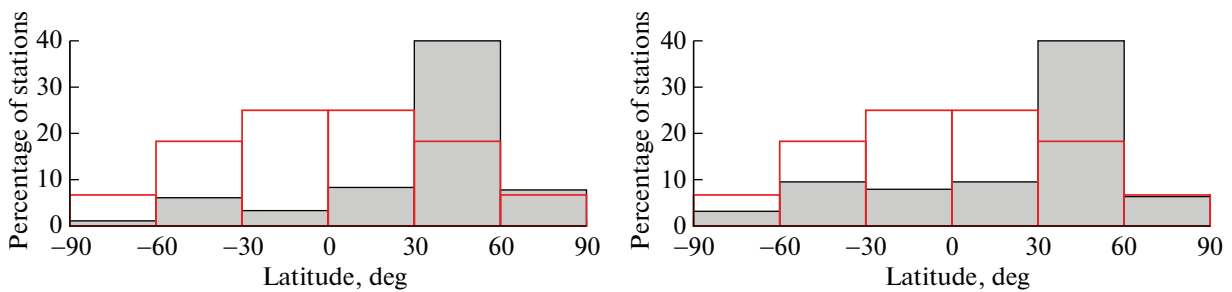


Рис. 14. Распределение станций по 30-градусным широтным зонам: слева все 182 станции, справа – 63 станции с числом сессий не менее 90. Симметричная ступенчатая линия соответствует теоретическому равномерному распределению станций по поверхности Земли.

блюдений, 50% наблюдений сделано на 13 станциях, а 39 станций обеспечили больше 90% наблюдений (рис. 12).

На рис. 13 показана статистика наблюдения для наиболее активных станций. Как уже обсуж-

далось выше, РСДБ-станции неравномерно расположены по поверхности Земли, большинство их расположено в северном полушарии. На рис. 14 показано распределение станций по 30-градусным широтным зонам.

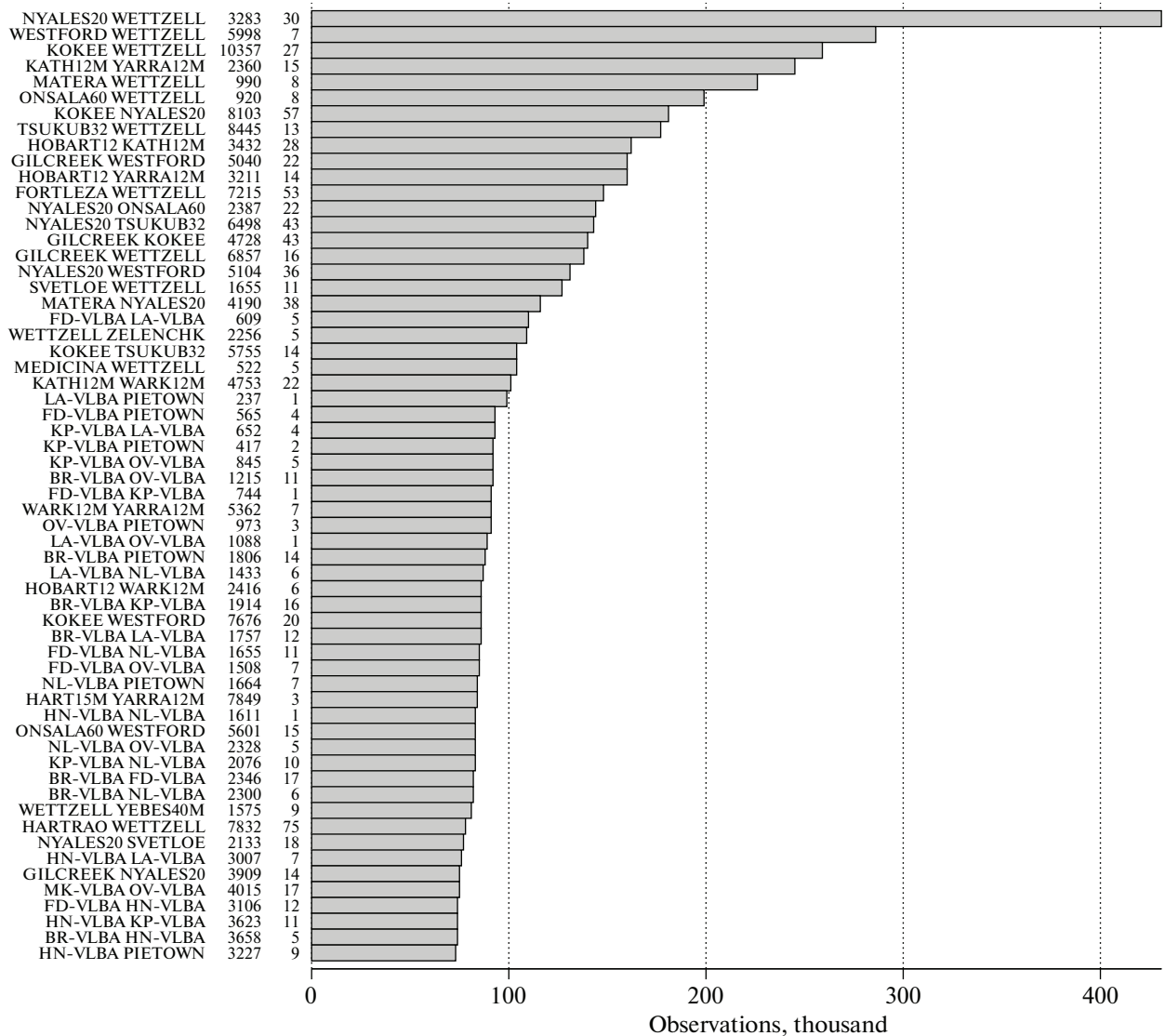


Рис. 15. Число наблюдений (в тысячах), полученных на 60 наиболее активно использовавшихся базах между РСДБ-антеннами. После названия базы (участвовавших станций) приведены длина базы в километрах и разность широт станций в градусах.

Важной и непосредственно наблюдаемой величиной в РСДБ является длина базы между станциями, с чего, собственно, и начались геодезические приложения РСДБ. На рис. 15 показана статистика наблюдений, полученных на 60 наиболее часто наблюдавшихся базах. Эта статистика показывает, что основная масса наблюдений произведена на базах с преимущественно широтной протяженностью (с небольшой разностью широт станций, образующих базу), что скорее всего является основной причиной более высокой точности определения прямых восхождений по сравнению с точностью определения склонений, как обсуждалось в разделе 3.

Одним из основных приложений РСДБ является изучение изменений координат станций и

длин баз между ними. При этом важно, что длина базы между двумя РСДБ-станциями является инвариантом по отношению к принятой системе координат. Именно измерение длин баз стало первым научно значимым результатом применения метода РСДБ и до сих пор остается одним из основных геодезических результатов, получаемых этим методом наблюдений. Достаточно сказать, что именно по изменениям длин межконтинентальных баз между американскими и европейскими РСДБ-станциями было впервые надежно обнаружено взаимное движение тектонических плит.

Ошибка определения длины базы традиционно используется в РСДБ для оценки точности геодезических измерений. Первые измерения

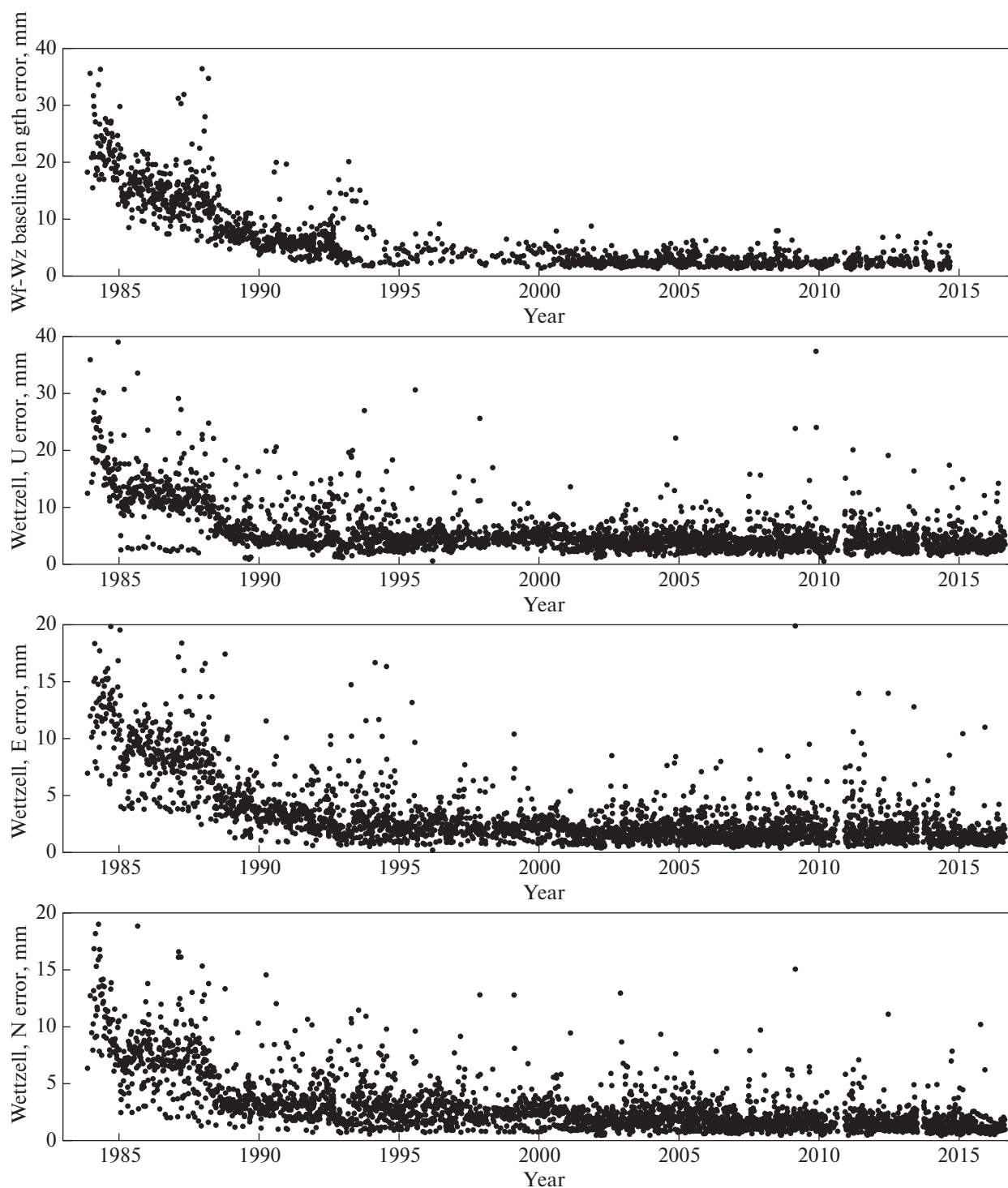


Рис. 16. Эволюция точности определения длин баз и координат станций со временем. Сверху вниз: ошибка длины базы WESTFORD–WETZELL, ошибка вертикальной составляющей положения станции WETZELL, ошибки восточной и северной горизонтальных составляющих станции WETZELL.

длин баз имели метровую точность, однако уже к началу 1970-х годов точность улучшилась до ~10 см, а к началу 1980-х годов точность достигла ~2 см [10]. Такое резкое улучшение точности в

первые 10–15 лет развития РСДБ объясняется, в первую очередь, переходом РСДБ-систем от стандарта Mark-1 к стандарту Mark-3 [10]. Дальнейшее повышение точности наблюдений произошло в

результате перехода к стандарту Mark-4. В наше время ошибка определения длины базы составляет около 2 мм. Эволюция точности определения координат станций и длин баз за последние 30 лет показана на рис. 16 на примере станций WETTZELL и WESTFORD. Данные для этого графика были любезно предоставлены Daniel MacMillan (GSFC). Отметим, что станция WETTZELL наблюдала в наибольшем числе сессий, а база WESTFORD–WETTZELL – наиболее часто используемая межконтинентальная база.

Сравнение ошибок определения вертикальной и горизонтальных составляющих вектора координат станции показывает, что ошибки горизонтальных компонент примерно одинаковы, а ошибка вертикальной составляющей примерно вдвое больше, что характерно и для других измерений методами космической геодезии. Также можно заметить, что после 1993 г. ошибки координат и длин баз практически не уменьшаются, что соответствует эволюции точности определения ПВЗ, обсуждаемой в следующем разделе.

5. ПАРАМЕТРЫ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Определение ПВЗ является одним из основных научных и прикладных приложений РСДБ. Метод РСДБ является единственным высокоточным методом, позволяющим производить определения прецессии и нутации земной оси, и определения всемирного времени. Без результатов РСДБ невозможно построение современных теорий прецессии-нутации. Эти же наблюдения вариаций положения небесного полюса играют важную роль для изучения строения Земли и внутренних процессов в теле Земли. Поэтому программам наблюдения ПВЗ придается большое значение при планировании работы сети IVS. Так, в 2018 г. из 181 регулярной 24-часовой сессии IVS 105 были предназначены для определения ПВЗ. Разумеется, эти сессии используются и для всех других астрометрических и геодезических решений, но их расписание оптимизировано, в первую очередь, для получения наиболее точных значений ПВЗ. Кроме того, состоялись 366 коротких сессий для оперативного определения всемирного времени.

До 1980-х годов данные РСДБ использовались для определения ПВЗ нерегулярно. Обзор ранних работ по определению ПВЗ методом РСДБ до начала 1980-х годов можно найти, например, в [45, 57]. Первыми специальными программами для определения ПВЗ были программа геодезической службы США POLARIS (146 сессий с ноября 1980 г. по ноябрь 1990 г.) и программа JPL TEMPO (с середины 1980 г.). Только наблюдения POLARIS доступны в центре данных IVS. При этом первые три года наблюдения по этой программе проводились на двух, реже трех станциях США, и толь-

ко с конца 1983 г. к сети POLARIS присоединилась европейская станция WETTZELL. Наблюдения универсальной программы CDP с августа 1979 г. также использовались для определения ПВЗ. Основные наблюдательные РСДБ-программы для определения ПВЗ начались в 1984 г. и были основаны на наблюдениях в стандарте Mark-4. Первой из этих программ была IRIS-A, наблюдения на которой производились с 4 января 1984 г. по 26 апреля 1993 г. Наблюдения по этой программе велись сначала раз в 5 дней, а с конца апреля 1991 г. раз в неделю. Всего по этой программе было получено 637 сессий. Параллельно с 29 апреля 1987 г. по 19 октября 1994 г. велись ежемесячные наблюдения на альтернативной сети станций по программе IRIS-P. Всего по этой программе было получено 92 сессии. Также в период с 9 января 1986 г. по 13 декабря 2001 г. проводились наблюдения по программе IRIS-S, сеть которой включала южную станцию HARTRAO (Южная Африка) и иногда SANTI12 (Чили). По этой программе было получено 167 сессий со средним интервалом около месяца. Важное значение для повышения точности определения ПВЗ имела организация программ NEOS-A (452 сессии с 5 мая 1993 г. – 27 декабря 2001 г.), которая стала основной программой ПВЗ на эти годы, и CORE (148 сессий с 8 января 1997 г. по 19 декабря 2001 г.), наблюдения на которой, кроме самостоятельного значения, также использовались для сравнения с программой NEOS-A для изучения систематических ошибок определений ПВЗ из РСДБ-наблюдений. С начала 2002 г. основными программами определения ПВЗ IVS стали программы R1 и R4. Наблюдения по ним проводятся дважды в неделю, обычно по понедельникам (R1) и четвергам (R4) (дни недели относятся к моменту начала сессии).

Изменение со временем ошибок определения ПВЗ из РСДБ-наблюдений приведено на рис. 17. На графиках каждая точка соответствует одной 24-часовой серии наблюдений. Данные взяты из ряда ПВЗ, вычисленного в GSFC⁷. На этом же рисунке приведены данные для пяти основных наблюдательных программ определения ПВЗ: IRIS-A, IRIS-S, NEOS-A, R1 и R4. На представленных графиках хорошо видны несколько моментов резкого улучшения точности ПВЗ. Наиболее заметны из них скачок в мае 1993 г. после запуска программы NEOS-A и в начале 2002 г. после перехода на программы R1 и R4. Эти особенности рядов ПВЗ полезно учитывать при определении оптимального интервала данных для изучения долгопериодических вариаций вращения Земли, например, для уточнения модели прецессии-нутации [58].

⁷ <ftp://cddis.nasa.gov/vlbi/ivsproducts/eops/gsf2016a.eops.gz>

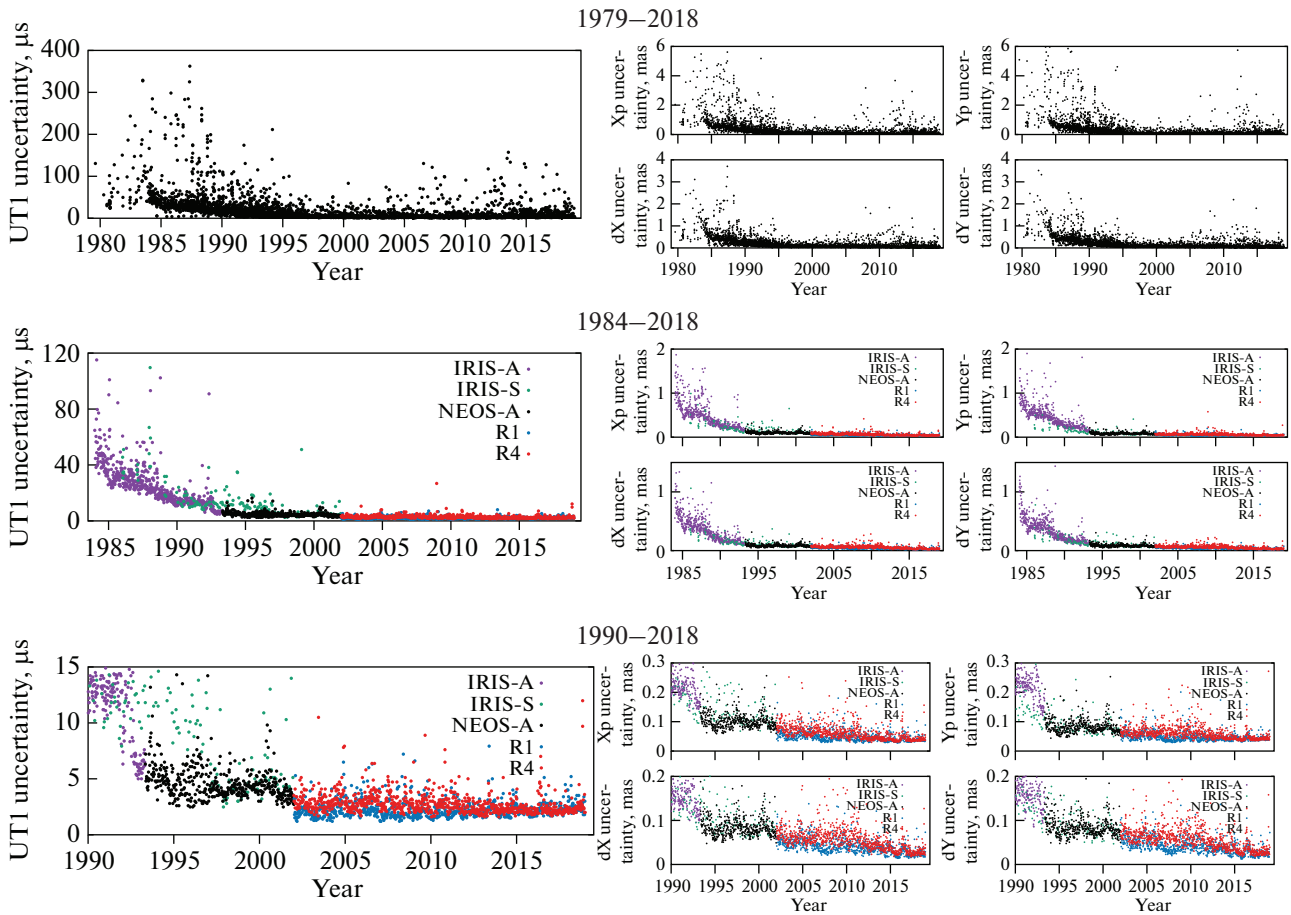


Рис. 17. Изменение ошибок определения ПВЗ со временем по данным GSFC для всего периода наблюдений (верхняя панель), и для пяти основных программ определения ПВЗ с 1985 г. (средняя панель) и с 1990 г. (нижняя панель). На левой панели приведены данные для всемирного времени в мкс. Изменение ошибок остальных четырех ПВЗ (координаты полюса X_p и Y_p и поправки к углам прецессии-нутаии dX и dY) со временем носит такой же характер и показано на правой панели рисунка в мсд. Периоды действия основных наблюдательных программ определения ПВЗ: IRIS-A 1984.0–1993.0, IRIS-S 1986.0–2002.0, NEOS-A 1993.3–2002.0, R1 и R4 с 2002.0.

На рис. 18 приведено изменение со временем ошибок определения всемирного времени по часовым сериям наблюдений для пулковского ряда ПВЗ⁸. На графиках каждая точка соответствует одной серии Intensive. Сравнение с рядами всемирного времени, вычисленными по часовым сериям в других центрах, показало, что все они близки между собой.

Как было показано в [49], как внутренние, так и внешние ошибки ПВЗ хорошо коррелируют с размерами сети, в первую очередь с ее геометрическим объемом. На рис. 19 показаны изменения со временем геометрических параметров РСДБ-сетей, наблюдения с которых собраны в архиве IVS. Сопоставление этих данных с данными по улучшению точности определения ПВЗ, при-

веденными выше, подтверждает их тесную зависимость.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К своему двадцатилетию IVS стала основной международной организацией, координирующей деятельность десятков институтов во многих странах, работающих в области радиоастрометрии и РСДБ-системы космической геодезии. В настоящее время в работе IVS участвуют около 60 РСДБ-антенн, расположенных во многих странах всех континентов (в наблюдениях 2018 г. были задействованы 57 антенн). В составе IVS работают также центры технологического развития, операционные центры, осуществляющие планирование наблюдений и координацию работы станций, центры хранения данных и центры анализа данных. Всего в работе службы участвуют институты более двадцати стран.

⁸ <ftp://cddis.nasa.gov/vlbi/ivsproducts/eopi/pul2010a.eopi.gz>

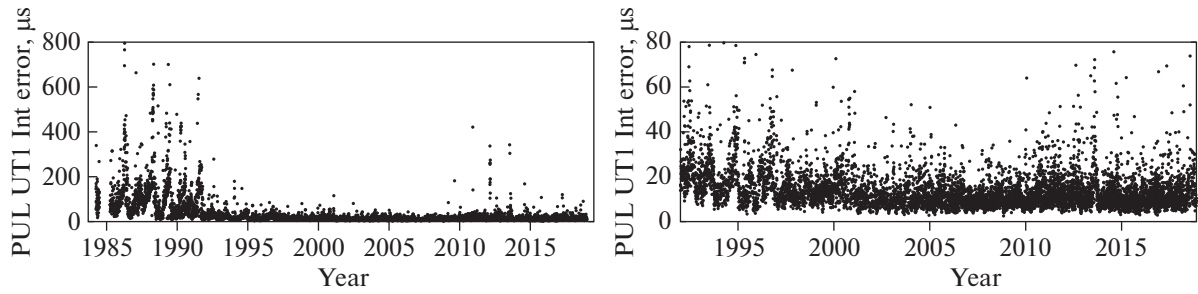


Рис. 18. Изменение ошибок определения всемирного времени по сериям UT1 Intensive (данные ГАО РАН) в мкс: слева – все данные, справа – данные после 1992 г.

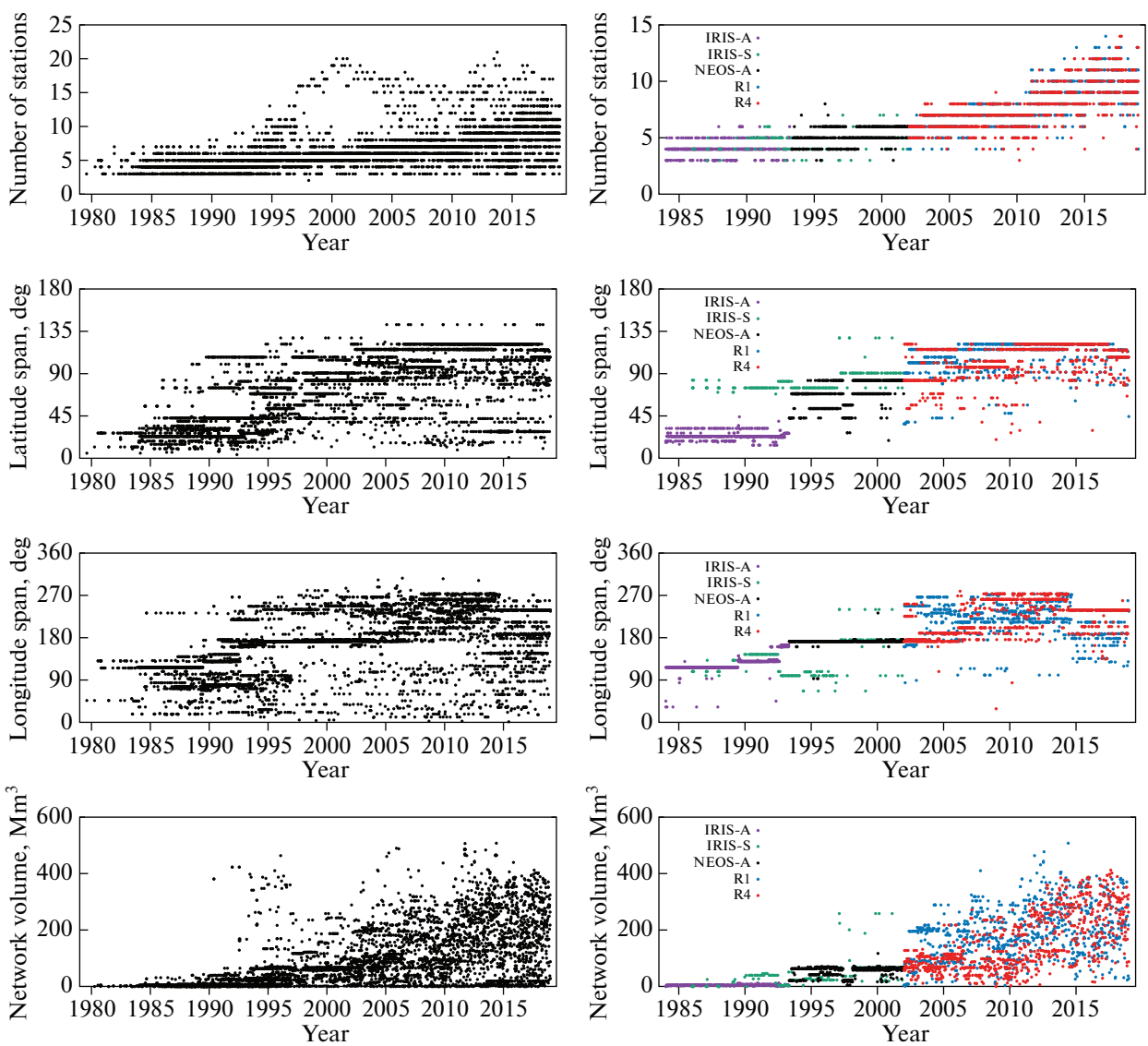


Рис. 19. Изменение геометрических характеристик РСДБ-сети IVS со временем. Сверху вниз: число станций, размер сети по широте, размер сети по долготе и объем сети. На левой панели приведены данные для всех сессий, на правой – сессии основных программ определения ПВЗ.

В центре данных IVS к настоящему времени накоплено более 17 миллионов наблюдений и в среднем более миллиона наблюдений добавляется к ним ежегодно. Результаты обработки этих наблюдений с большим весом используются при выводе международной опорной земной системы отсчета ITRF и ПВЗ. IVS совместно с МАС используют наблюдения, хранящиеся в центре данных IVS, для вывода ICRF, официальной международной небесной системы отсчета с 1998 г.

Метод РСДБ также является единственным высокоточным современным методом определения всемирного времени и движения небесного полюса. Кроме того, РСДБ играет уникальную роль в поддержании долговременной стабильности рядов ПВЗ и земной системы координат.

В настоящее время IVS продолжает активно развиваться. Быстро растет сеть станций нового поколения VGOS, работающих на основе быстрых антенн и широкополосных высокоскоростных систем приема и регистрации сигнала. Кроме уже работающих станций, упомянутых выше, вводятся в строй новые станции, такие, например, как 13-метровые телескопы, установленные на обсерваториях ИПА РАН SVETLOE, ZEL-ENCHK и BADARY [59, 60]. В практику работы сети IVS внедряются новые методы планирования и контроля работы РСДБ-станций. Для повышения точности обработки результатов совершенствуются астрономические и геофизические модели и методы анализа данных. Все это позволяет уверенно говорить об усилении в ближайшие годы роли радиоастрометрии в астрономии, геодезии, науках о Земле, а также при решении прикладных задач.

БЛАГОДАРНОСТИ

Все данные РСДБ-наблюдений, использованные в этой работе, получены благодаря многолетней трудной и высококвалифицированной работе многих людей и организаций, внесших и вносящих вклад в работу IVS: наблюдательных станций и корреляторов, технических центров и центров планирования и обработки наблюдений, а также координаторов деятельности IVS. Их вклад в развитие науки заслуживает высочайшего признания.

Автор благодарен Daniel MacMillan (NVI Inc., NASA GSFC) за предоставленные ряды координат станций и длин баз, а также David Gordon (NVI Inc., NASA GSFC) и Alan Fey (U.S. Naval Observatory) за предоставленные каталоги координат радиоисточников.

Часть наблюдений за 2018 г. была обработана с помощью конвертера данных из формата vgosDB в формат NGS⁹, написанного Светланой Миро-

новой, Еленой Скурихиной и Сергеем Курдубовым (Институт прикладной астрономии РАН).

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

При подготовке статьи использовалась реферативная база SAO/NASA Astrophysics Data System¹⁰ (ADS).

Автор благодарен анонимному рецензенту за полезные замечания по первоначальному варианту статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. T. Sullivan III, in *Radio Interferometry. Theory, Techniques, and Applications*, Proc. of the 131st IAU Colloquium, edited by T. J. Cornwell and R. A. Perley (San Francisco: ASP, 1991), ASP Conf. Ser. **19**, 132 (1991).
2. M. Ryle and D. D. Vonberg, *Nature* **158**, 339 (1946).
3. M. Ryle, F. G. Smith, and B. Elsmore, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **110**, 508 (1950).
4. M. Ryle, *Vistas Astron.* **1**, 532 (1955).
5. K. I. Kellermann and M. H. Cohen, *J. Royal Astron. Soc. Canada* **82**, 248 (1988).
6. J. M. Moran, in *Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources*, Proc. of the 164th IAU Colloquium, edited by J. A. Zensus, G. B. Taylor, and J. M. Wrobel (San Francisco: ASP, 1998), ASP Conf. Ser. **144**, 1 (1998).
7. B. G. Clark, in *Radio Astronomy at the Fringe*, edited by J. A. Zensus, M. H. Cohen, and E. Ros (San Francisco: ASP, 2003), ASP Conf. Ser. **300**, 1 (2003).
8. L. I. Matveenko, *Astron. Nachricht.* **328**, 411 (2007).
9. L. I. Matveenko, N. S. Kardashev, and G. B. Sholomitskii, *Radiophysics and Quantum Electronics* **8**, 461 (1965).
10. J. W. Ryan and C. Ma, *Phys. Chem. Earth* **23**, 1041 (1998).
11. G. W. Brown, T. D. Carr, and W. F. Block, *Astrophys. Lett.* **1**, 89 (1968).
12. T. D. Carr, M. A. Lynch, M. P. Paul, G. W. Brown, J. May, N. F. Six, V. M. Robinson, and W. F. Block, *Radio Science* **5**, 1223 (1970).
13. N. W. Broten, T. H. Legg, J. L. Locke, C. W. McLeish, et al., *Science* **156**, 1592 (1967).
14. N. W. Broten, J. L. Locke, T. H. Legg, C. W. McLeish, and R. S. Richards, *Nature* **215**, 38 (1967).
15. C. Bare, B. G. Clark, K. I. Kellermann, M. H. Cohen, and D. L. Jauncey, *Science* **157**, 189 (1967).
16. O. J. Sovers, J. L. Fenselow, and C. S. Jacobs, *Rev. Modern Physics* **70**, 1393 (1998), arXiv:astro-ph/9712238.

⁹ <https://github.com/AstroLis/VGOSdb2NGS>

¹⁰ <https://ui.adsabs.harvard.edu/>

17. V. E. Zharov, Basics of radio astrometry (Moscow: Moscow State University, Faculty of Physics, 2011).
18. A. M. Finkelstein, V. S. Gubanov, and Y. S. Yatskiv, in *Developments in Astrometry and their Impact on Astrophysics and Geodynamics*, Proc. of the 156th Symposium of the IAU held in Shanghai, China, September 15–19, 1992, edited by I. I. Mueller and B. Kolaczek (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993), p. 191.
19. A. Finkelstein, A. Ipatov, and S. Smolentsev, in *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proceedings*, held Ottawa, Canada, February 9–11, 2004, edited by N. R. Vandenberg and K. D. Baver (NASA/CP-2004-212255, 2004), p. 161 [http://ivsc.gsfc.nasa.gov].
20. J. Amagai, H. Kiuchi, and N. Kawaguchi, *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement* **38**, 672 (1989).
21. T. Kondo, N. Kurihara, Y. Koyama, J. Nakajima, et al., in *13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, p. 80 (1999).
22. S. Ogi, in *13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, p. 89 (1999).
23. Z. Qian, S. Ye, X. Hong, X. Zhang, J. Zhang, X. Zhang, and H. Zhang, in *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proc.*, held Ottawa, Canada, February 9–11, 2004, edited by N. R. Vandenberg and K. D. Baver (NASA/CP-2004-212255, 2004), p. 133 [http://ivsc.gsfc.nasa.gov].
24. J. E. J. Lovell, J. N. McCallum, P. B. Reid, P. M. McCulloch, et al., *J. Geodesy* **87**, 527 (2013), arXiv:1304.3213 [astro-ph.IM].
25. M. Stagni, M. Negusini, G. Bianco, and P. Sarti, in *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2016 General Meeting Proceedings: New Horizons with VGOS*, edited by D. Behrend, K. D. Baver, and K. L. Armstrong (NASA/CP-2016-219016, 2016), p. 132.
26. W. Schlüter, E. Himwich, A. Nothnagel, N. Vandenberg, and A. Whitney, *Adv. Space Research* **30**, 145 (2002).
27. Z. Malkin, in *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proc.*, held Ottawa, Canada, February 9–11, 2004, edited by N. R. Vandenberg and K. D. Baver (NASA/CP-2004-212255, 2004), p. 47, arXiv:1102.0665 [physics.geo-ph].
28. M. Brubé, R. Strand, and E. Himwich, in *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2015M Biennial Report*, edited by K. D. Baver, D. Behrend, and K. L. Armstrong (NASA/TP-2017-219021, 2017), p. 29.
29. D. Behrend, J. Böhm, P. Charlot, T. Clark, et al., in *Observing our Changing Earth*, edited by M. G. Sideris (Berlin, Heidelberg, Springer, 2009), *Intern. Ass. Geodesy Symposia* **133**, 833 (2009).
30. A. Niell, J. Barrett, A. Burns, R. Cappallo, et al., *Radio Science* **53**, 1269 (2018) [https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018R%20S006617].
31. D. S. McMillan, W. E. Himwich, C. C. Thomas, N. R. Vandenberg, J. M. Bosworth, B. Chao, T. A. Clark, and C. Ma, in *13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, edited by D. Behrend and A. Rius, **13**, 166 (1999).
32. H. Schuh, P. Charlot, H. Hase, E. Himwich, et al., in *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2001 Annual Report*, edited by N. R. Vandenberg and K. D. Baver (NASA/TP-2002-210001, 2002), p. 13.
33. A. Nothnagel, D. Behrend, A. Bertarini, P. Charlot, et al., in *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2016 General Meeting Proceedings*, edited by D. Behrend, K. D. Baver, and K. L. Armstrong (NASA/CP-2016-219016, 2016), p. 3.
34. M. Sekido, H. Takiguchi, Y. Koyama, T. Kondo, et al., *Earth, Planets and Space* **60**, 865 (2008).
35. A. M. Finkelstein, M. N. Kaidanovskii, A. I. Sal'nikov, A. G. Mikhailov, I. A. Bezrukov, E. A. Skurikhina, and I. F. Surkis, *Astron. Letters* **37**, 431 (2011).
36. D. Gordon, C. Jacobs, A. Beasley, A. Peck, et al., *Astron. J.* **151**, 154 (2016).
37. C. Jacobs, F. Arias, D. Boboltz, J. Boehm, et al., in *Proc. of the Journos 2013 "Systèmes de référence spatio-temporels"*. *Scientific developments from highly accurate space-time reference systems*, held Observatoire de Paris, 16–18 September 2013, edited by N. Capitaine, p. 51 (2014).
38. C. Ma, in *Reference Frames*, edited by J. Kovalevsky, I. I. Mueller, and B. Kolaczek, *Astrophys. Space Sci. Library* **154**, 43 (1989).
39. W. Fricke, in *Proper Motions*, Proc. of IAU Colloquium 7, held at Control Data Corporation, Minneapolis, MN, 21–23 April, 1970, edited by W. J. Luyten (Minneapolis: University of Minnesota, 1970), p. 105.
40. M. H. Cohen and D. B. Shaffer, *Astron. J.* **76**, 91 (1971).
41. A. E. E. Rogers, C. C. Counselman, III, H. F. Hinteregger, C. A. Knight, D. S. Robertson, I. I. Shapiro, A. R. Whitney, and T. A. Clark, **186**, 801 (1973).
42. T. A. Clark, L. K. Hutton, G. E. Marandino, C. C. Counselman, et al., *Astron. J.* **81**, 599 (1976).
43. J. L. Fanselow, O. J. Sovers, J. B. Thomas, T. J. Bletzacker, et al., in *Reference Coordinate Systems for Earth Dynamics*, Proc. of the 56th Colloquium of the IAU held in Warsaw, Poland, September 8–12, 1980, edited by E. M. Gaposchkin and B. Kolaczek (Cambridge University Press, 1980), *Proc. IAU Symp.* **56**, 351 (1980).
44. N. D. Umarbayeva, *Bull. SAO* **16**, 5 (1976).
45. H. С. Блинов, *Итоги науки и техники. Сер. Астрономия* **23**, 5 (1983).
46. H. G. Walter, *Astron. and Astrophys.* **210**, 455 (1989).
47. C. Ma, E. F. Arias, T. M. Eubanks, A. L. Fey, et al., *Astron. J.* **116**, 516 (1998).
48. A. L. Fey, D. Gordon, C. S. Jacobs, C. Ma, et al., *Astron. J.* **150**, 58 (2015).
49. Z. Malkin, *J. Geodesy* **83**(6), 547 (2009), arXiv:0908.1793 [physics.geo-ph].
50. T. A. Herring, B. E. Corey, C. C. Counselman III, I. I. Shapiro, et al., *J. Geophys. Res. Solid Earth* **86**, 1647 (1981).
51. T. A. Herring, I. I. Shapiro, T. A. Clark, C. Ma, et al., *J. Geophys. Res. Solid Earth* **91**, 8341 (1986).
52. C. Ma, J. M. Sauber, T. A. Clark, J. W. Ryan, L. J. Bell, D. Gordon, and W. E. Himwich, *J. Geophys. Res. Solid Earth* **95**, 21991 (1990).

53. *T. A. Clark, C. Ma, D. Gordon, A. Mallama, and W. E. Himwich*, *J. Geophys. Res.* **92**, 12741 (1987).
54. *G. Blewitt and D. Lavallo*, *J. Geophys. Res. Solid Earth* **107**, 2145 (2002).
55. *Z. Altamimi, P. Rebischung, L. Métivier, and X. Collilieux*, *J. Geophys. Res. Solid Earth* **121**, 6109 (2016).
56. *C. Abbondanza, T. M. Chin, R. S. Gross, M. B. Heflin, J. W. Parker, B. S. Soja, T. van Dam, and X. Wu*, *J. Geophys. Res. Solid Earth* **122**, 8474 (2017).
57. *H. Moritz and I. I. Mueller*, *Earth rotation: theory and observation* (New York: Ungar, 1987).
58. *Z. M. Malkin*, *Astron. Rep.* **58**, 415 (2014).
59. *A. Ipatov, D. Ivanov, G. Ilin, S. Smolentsev, et al.*, in *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2014 General Meeting Proceedings. "VGO: The New VLBI Network"*, edited by D. Behrend, K. D. Baver, and K. L. Armstrong (Beijing, China: Science Press, 2014), p. 25.
60. *E. Nosov, D. Ivanov, A. Ipatov, V. Mardyshkin, et al.*, in *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2018 General Meeting Proceedings. "Global Geodesy and the Role of VGOS – Fundamental to Sustainable Development"*, edited by K. L. Armstrong, K. D. Baver, and D. Behrend (NASA/CP-2019-219039, 2019), p. 12.