

ВКР «Определение параметров постньютоновского формализма из глобальной обработки РСДБ наблюдений»

Аспирант: Миронова Светлана Михайловна

Научный руководитель: Курдубов Сергей Леонидович

- Оценка параметра γ из глобального уравнивания РСДБ наблюдений за период 1980-201? год
- Вывод формулы для РСДБ задержки в полном ППН формализме (или как минимум с параметром β)
- Оценки параметров α , β и Δ
- Оценка стабильности астрометрических результатов при вариации ППН параметров
- Построение каталога координат радиоисточников, представление в ICRF3 WG

1. Модификация программы QUASAR с целью проведения глобального уравнивания РСДБ наблюдений
2. Модификация программы SINCOM для последующего комбинирования РСДБ, ЛЛС, ГНСС наблюдений
3. Построение небесной и земной систем координат
4. Уточнение редукционных моделей, применяемых при обработке РСДБ наблюдений
5. Получение оценок для величины ускорения Солнечной системы, ППН параметра γ
 - Оценивание ППН параметра γ из обработки РСДБ наблюдений
 - Обзор формул для РСДБ задержки (с параметром γ)
 - Оценка влияния редукционных моделей и параметров уравнивания на определение ППН параметра γ

Изменения, внесенные в программу QUASAR:

- Вычисление скорости изменения задержки РСДБ сигнала
- Обновление параметров априорных моделей, вычисленных в процессе глобального уравнивания или предложенных другими авторами
- Учет структуры источника в процессе глобального уравнивания

Вспомогательные программы для запуска и анализа глобального решения:

- Автоматическое обновление априорных рядов ПВЗ
- Визуализация поправок к UT1, невязок часовых РСДБ сессий (служба)
- Выбор станций и источников для наложения NNR/NTT условий
- Моделирование наблюдений тестовой станции (добавление наблюдений в NGS-файл)

Создание консольной версии пакета QUASAR в рамках работы по НИР «Вызов»

- E. Skurikhina, S. Kurdubov, V. Gubanov, S. Mironova: IAA VLBI Analysis Center 2015–2016 Biennial Report // International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2015+2016 Biennial Report, 233-235 (2017)
- В. С. Губанов, С. Л. Курдубов, С. М. Миронова, И. Ф. Суркис: Учет структурной задержки при обработке РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН вып. 45, 43–50 (2018)
- E. Skurikhina, S. Kurdubov, V. Gubanov, S. Mironova, A. Kudelkin: IAA VLBI Analysis Center 2017–2018 Biennial Report
- Sergei L Kurdubov, Dmitry A Pavlov, Svetlana M Mironova, Sergey A Kaplev: Earth–Moon very-long-baseline interferometry project: modelling of the scientific outcome // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 486, Issue 1, 815–822 (2019)
- «EWASS-2017» Sergei Kurdubov, Vadim Gubanov, Svetlana Mironova // STRUCTURE DELAY IN VLBI DATA PROCESSING
- «EWASS-2017» Sergei Kurdubov, Varvara Tanyukhina, Svetlana Mironova // STATISTICAL ANALYSIS OF VLBI GLOBAL SOLUTION RESIDUALS
- «EVGA-2017» E. Skurikhina, S. Kurdubov, V. Gubanov, S. Mironova // VLBI Analysis at the IAA
- «КВНО-2019» Определение параметров вращения Земли в ИПА РАН по наблюдениям различных сетей, Гаязов И. С., Губанов В. С., Курдубов С. Л., Скурихина Е. А., Суворкин В. В., Миронова С. М., Шарков В. С., Рец Я. П.

Управляющие программы для комбинирования данных:

- Приведение данных различных центров анализа к одному виду
- Представление данных локальных связей в SINEX-формате
- Контроль результатов, полученных на этапах индивидуальных и комбинированных рядов
- Сравнение комбинированных данных с результатами других центров комбинирования

Создание документации для пакета SINCOM и управляющих программ для решения задач ГСВЧ

- Курдубов С. Л., Миронова С. М. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ПМО "SINCOM" (2018)
- «UAW 2019» Dmitry Pavlov et al., VLBI, LLR & GNSS Solutions at the Institute of Applied Astronomy RAS
- «КВНО-2019» Построение ряда UT1-UTC из комбинирования результатов обработки часовых РСДБ сессий по программе IVS Intensive, Курдубов С.Л., Миронова С.М., Гаязов И.С.
- «КВНО-2019» Уточнение координат станций из комбинирования РСДБ, ГНСС и ЛЛС данных, Курдубов С. Л., Миронова С. М., Гаязов И. С.

2 Построение ряда UT1-UTC из комбинирования РСДБ сессий

Были скомбинированы 358 сессий (IVS Intensive, с 2017 по 2019 гг.) с целью уточнения параметра UT1

	finals	BKG	GSF	IAA	USN	COMB
	Средняя разность UT1					
C04	-5	-6	1	-1	2	-1
finals		0	7	4	7	4
BKG			-4	-5	6	-4
GSF				3	1	0
IAA					1	1
USN						2
	СКО UT1					
C04	23	35	35	34	32	32
finals		22	20	24	18	20
BKG			10	17	11	11
GSF				13	8	8
IAA					13	7
USN						7

Построение каталога радиоисточников для предварительной версии ICRF3

Созданы средства сравнения каталогов, представленных различными центрами для ICRF3

Участие в рабочей группе по созданию каталога ITRF2020

- Курдубов С. Л. , Миронова С. М., Губанов В. С., Скурихина Е. А.: Построение уточненной версии небесной системы координат из глобальной обработки РСДБ-сессий 1979–2019 гг. // Труды ИПА РАН, вып. 50 (2019)
- «КВНО-2019» Построение уточненной версии небесной системы координат из глобальной обработки РСДБ-сессий 1979-2019 года, Курдубов С. Л., Миронова С. М., Губанов В. С., Скурихина Е. А.

3 Сравнение каталога радиоисточников iaa2019 с каталогами других центров анализа и с ICRF3



Каталог iaa2019 построен по РСДБ наблюдениям с 1979 по 2019 год (4213 источников)

Каталог 1	Каталог 2	$N (> 1000$ задержек)	$\overline{\Delta\alpha \cos \delta}$, мкс дуги	$\overline{\Delta\delta}$, мкс дуги	СКО $\Delta\alpha \cos \delta$, мкс дуги	СКО $\Delta\delta$, мкс дуги
iaa2019	asi2018a	42	-12	-98	155	568
	aus2018a	517	25	19	185	460
	bkg2017a	481	2	8	46	68
	opa2019a	516	4	15	47	65
	usn2016a	517	4	7	48	72
	ICRF2	517	4	25	101	164
	ICRF3	517	3	12	42	60

3 Сравнение каталога радиисточников iaa2019 с каталогом ICRF3



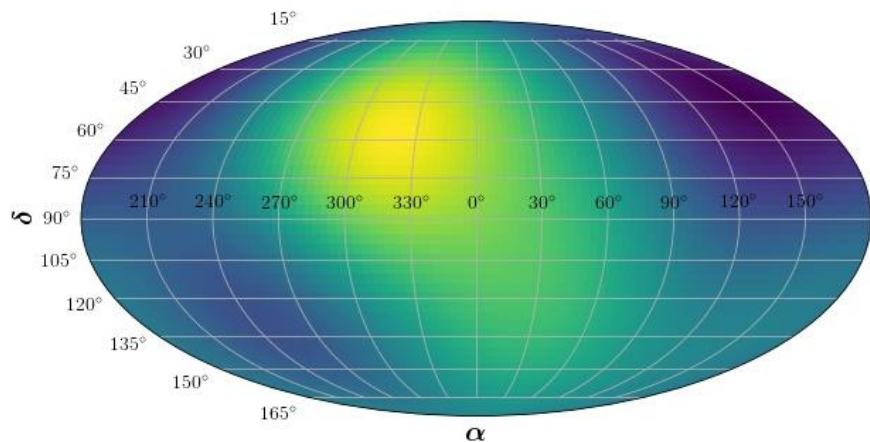
$$\Delta\alpha \cos \delta (\alpha, \delta) = \sum_{m,n=1}^N a_{\alpha,mn} C_n^m + \sum_{m,n=1}^N b_{\alpha,mn} S_n^m, \quad \Delta\delta(\alpha, \delta) = \sum_{m,n=1}^N a_{\delta,mn} C_n^m + \sum_{m,n=1}^N b_{\delta,mn} S_n^m,$$

$$C_n^m(\alpha, \delta) = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} \cos(m\alpha) P_n^m(\cos(\delta)), \quad S_n^m(\alpha, \delta) = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} \sin(m\alpha) P_n^m(\cos(\delta)),$$

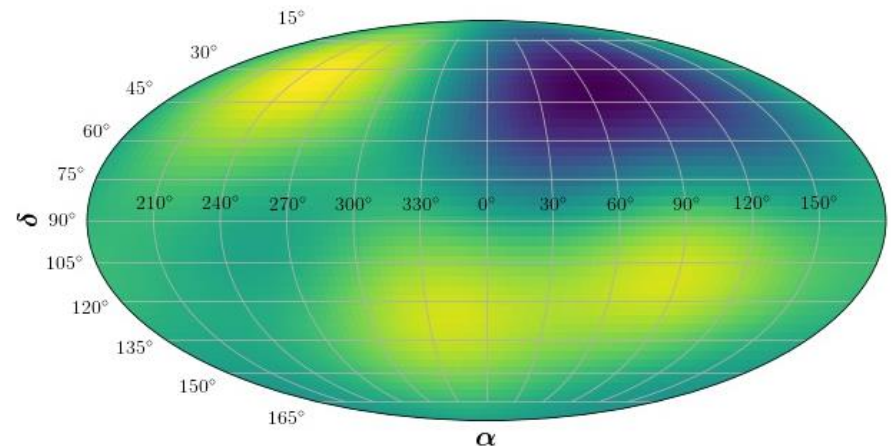
где $|m| \leq n, n \geq 0, 0 \leq \alpha \leq 2\pi, 0 \leq \delta \leq \pi, \delta = \delta_0 + \frac{\pi}{2}$

$$P_n^m = (-1)^m (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \frac{\partial^m}{\partial x^m} P_n(x),$$

$$P_v = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-v)_k (v+1)_k}{(k!)^2} \left(\frac{1-x}{2}\right)^k$$



разности между $\Delta\alpha \cos \delta$, мкс дуги



разности между δ , мкс дуги



4 Уточнение редукционных моделей, применяемых при обработке РСДБ наблюдений



- Параметры модели внутрисуточных вариаций ПВЗ
- Ковариационные функции стохастической части РСДБ сигнала
- Исследование инструментальных задержек

- Курдубов С. Л., Миронова С. М., Павлов Д. А.: Уточнение параметров гармоник внутрисуточных вариаций ПВЗ из результатов глобального уравнивания // Известия ГАО в Пулкове, № 225: Труды Всероссийской астрометрической конференции «Пулково-2018», Санкт-Петербург, 79–84 (2018)
- «ВРК-2018» Курдубов С. Л., Миронова С. М. // Вычисление ковариационных функций для метода средней квадратической коллокации на часовых интервалах РСДБ-наблюдений
- «Пулково-2018» Курдубов С.Л., Миронова С.М., Павлов Д.А. // Уточнение параметров гармоник внутрисуточных вариаций ПВЗ из результатов глобального уравнивания
- «EVGA-2019» Mironova S. M., Kurdubov S. L., Pavlov D. A., Nosov E. V. DIURNAL AND SUB-DIURNAL EOP VARIATIONS FROM VLBI GLOBAL SOLUTION

4 Рекомендованная модель учета внутрисуточных вариаций ПВЗ



$$\Delta\Theta = \sum_{i=1}^N \left[C_i \cos \left(\sum_{j=0}^5 (k_{ij}\alpha_j + n_i(h_\gamma + \pi)) \right) + S_i \sin \left(\sum_{j=0}^5 (k_{ij}\alpha_j + n_i(h_\gamma + \pi)) \right) \right]$$

где Θ – одна из координат земного полюса либо UT1;

C_i, S_i – амплитуды внутрисуточных гармоник;

N – количество внутрисуточных гармоник (всего 71);

j – пять фундаментальных астрономических аргументов, задающих относительные положения Земли, Солнца и Луны;

h – Гринвичское среднее звездное время;

n_i – коэффициент (-1 для суточных гармоник, -2 для полусуточных гармоник);

k_{ij} – коэффициенты, учитывающие влияние Солнца и Луны на гармонику.

4 Уточнение из глобального уравнивания параметров модели внутрисуточных вариаций ПВЗ



Уточнены из глобального уравнивания параметры модели внутрисуточных вариаций ПВЗ

- E8 (N=8)
- E70 (N=70)

Выполнена обработка РСДБ и ЛЛС наблюдений с уточненными (E8, E70) и рекомендованной (IERS) моделями вариаций ПВЗ

Оценивание ПВЗ из глобального уравнивания РСДБ наблюдений за 1979-2019 гг.

EOP	IERS	E8	E70
CIP-x, μs	168	167	166
CIP-y, μs	177	176	176
UT1-UTC, μs	14	14	14
POL-x, μs	179	178	179
POL-y, μs	158	158	158

WRMS невязок для ЛЛС станций с использованием рекомендованной (IERS) и уточненных (E8, E70) моделей вариаций ПВЗ, мм

Station	Observations	IERS	E8	E70
Cerga (MeO)	1836 (2009-2017)	1.421	1.419	1.425
Cerga (IR)	2840 (2015-2017)	1.298	1.296	1.299
APO	2648 (2006-2016)	1.387	1.382	1.380

5 Получение оценок для величины ускорения Солнечной системы, ППН параметра γ



Ускорение Солнечной системы:

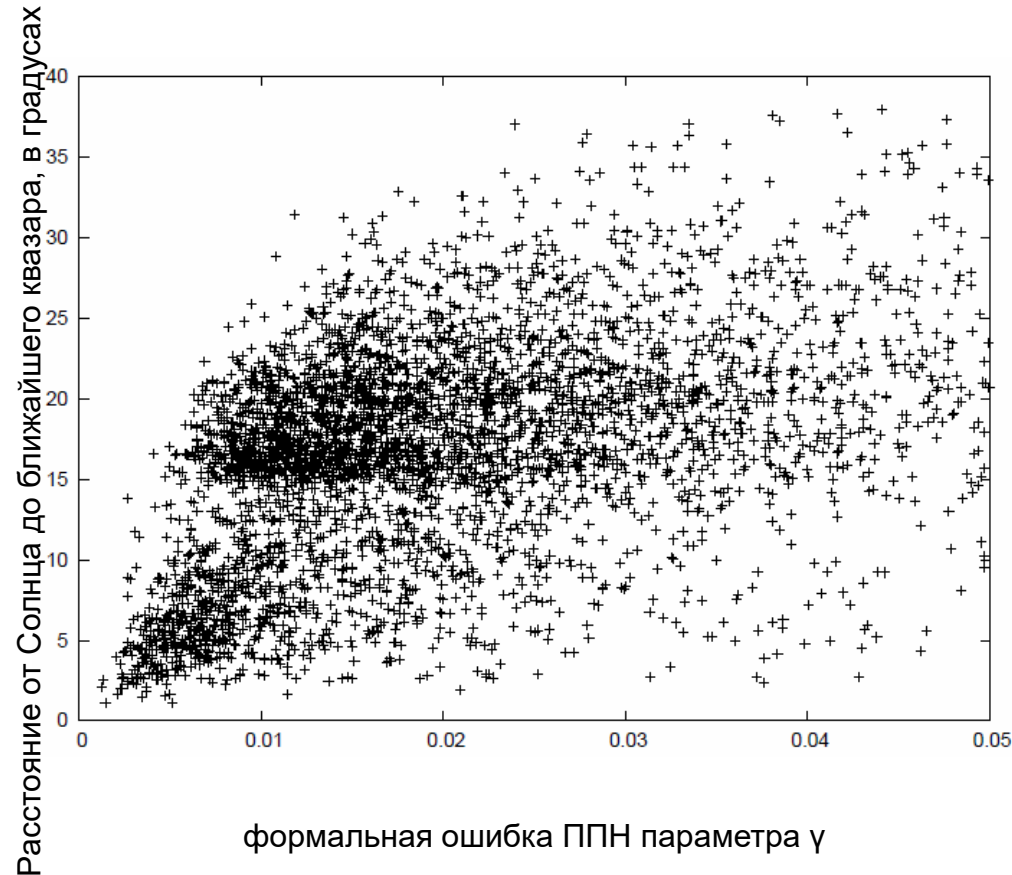
- Обзор оценок ускорения, полученных астрофизическими методами и методами РСДБ
- Оценивание ускорения из обработки РСДБ наблюдений

ППН параметр γ :

- Оценивание ППН параметра γ из обработки РСДБ наблюдений
- Обзор формул для РСДБ задержки (с параметром γ)
- Оценка влияния редуccionных моделей и параметров уравнивания на определение ППН параметра γ

- Курдубов С. Л., Миронова С. М.: Уточнение ППН-параметра γ из обработки РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН, вып. 47, 43–52 (2018)
- Курдубов С. Л., Миронова С. М.: Определение постньютоновского параметра γ из обработки суточной РСДБ сессии // Известия ГАО в Пулкове, № 225: Труды Всероссийской астрометрической конференции «Пулково-2018», Санкт-Петербург, 25–28 (2018)
- «Пулково-2018» Курдубов С.Л., Миронова С.М. // Определение постньютоновского параметра γ из обработки суточной РСДБ сессии
- «КВНО-2019» Оценивание ускорения Солнечной системы из глобального уравнивания РСДБ-наблюдений, Курдубов С. Л., Миронова С. М.
- «КВНО-2019» Определение ППН-параметра γ из различных суточных РСДБ сессий, Курдубов С. Л., Миронова С. М., Мельников А. Е.

5 Оценивание ППН параметра γ из односессионного и глобального уравнивания



γ	СКО γ	год	автор	задержки
1.008	0.005	1984	Робертсон	$4 \cdot 10^4$ с 1980 по 1984
1.0002	0.002	1991	Робертсон	$3 \cdot 10^5$ с 1980 по 1990
0.9996	0.0017	1995	Лебах	$2 \cdot 10^4$ в 1987
0.99983	0.0004	2004	Шапиро	$2 \cdot 10^6$ с 1979 по 1999
1.00031	0.00035	2009	Ламберт	$4 \cdot 10^6$ с 1979 по 2008
0.99992	0.00012	2011	Ламберт	$7 \cdot 10^6$ с 1979 по 2010
0.99972	0.00009	2018	Титов	$12 \cdot 10^6$ с 1979 по 2018

Таблица 1 Оценивание параметра γ из глобального уравнивания другими авторами

γ	СКО γ	
1.000002	0.000100	← все сессии
1.000135	0.000113	← сессии < 15°

Таблица 2 Оценивание параметра γ из глобального уравнивания пакетом QUASAR

5 Обзор оценок ускорения Солнечной системы, выполненных астрофизическими методами



Расстояние до центра Галактики (r) – из статьи E. Griv, M. Gedalin, Ing-Guey Jiang (2019)

Ускорение Солнечной системы ($|a_G|$) вычислено из r по модели C.Flynn, J. Sommer-Larsen, P.R. Christensen (1996)

автор, год	метод	r , кпк	$ a_G $, мкс/г
Majaess et al. (2009)	type II Cepheids	7.8 ± 0.6	7.0 ± 2.2
Matsunaga et al. (2009)	Mira variables	8.2 ± 0.4	6.4 ± 1.2
Yanhollebeke et al. (2009)	bulge stars	8.7 ± 0.5	5.7 ± 1.3
Ando et al. (2011)	H_2O masers	7.8 ± 0.3	7.0 ± 1.1
Sofue et al. (2011)	HI regions	7.5 ± 0.8	7.6 ± 3.3
Morris et al. (2012)	HI regions	7.7 ± 0.4	7.2 ± 1.5
Schonrich et al. (2012)	stellar kinematics	8.3 ± 0.3	6.2 ± 0.9
Francis & Anderson (2014)	red clump stars	7.5 ± 0.3	7.6 ± 1.2
Reid et al. (2014)	star forming regions	8.3 ± 0.2	6.2 ± 0.6
Chatzopoulos et al. (2015)	old nuclear stars	8.3 ± 0.2	6.2 ± 0.6
Boehle et al. (2016)	S-star cluster	7.9 ± 0.2	6.9 ± 0.7
Catchpole et al. (2016)	Mira variables	8.9 ± 0.4	5.4 ± 1.0
Fritz et al. (2016)	nuclear star cluster	8.5 ± 0.2	5.9 ± 0.6
Bhardwaj et al. (2017)	type II Cepheids	8.3 ± 0.3	6.2 ± 0.9
McMillan et al. (2017)	mass model	8.2 ± 0.1	6.4 ± 0.3
Braga et al. (2018)	type II Cepheids	8.5 ± 0.1	5.9 ± 0.3
Contreras R. et al. (2018)	RR Lyrae variables	8.1 ± 0.1	6.5 ± 0.3
Majaess et al. (2018)	RR Lyrae variables	8.3 ± 0.4	6.2 ± 1.2

5 Оценивание ускорения Солнечной системы из глобального уравнивания РСДБ-сессий



$|a_G|$ - модуль ускорения (5.8 ± 0.3 мкс/г, IVS WG8 on GA)
 α_G, δ_G - направление на центр Галактики ($266.4^\circ, -28.9^\circ$)

$ a_G $, мкс/г	α_G°	δ_G°	год	автор	источников
4.7 ± 0.5	288 ± 5	0 ± 5	2010	Курдубов	3009
6.4 ± 1.5	263 ± 11	-20 ± 12	2011	Титов	555
5.8 ± 0.4	243 ± 4	-11 ± 4	2012	Xu	3492
6.4 ± 1.1	266 ± 7	-26 ± 7	2013	Титов	3635
5.6 ± 0.4	267 ± 3	-11 ± 3	2014	MacMillan	-
5.9 ± 1.0	273 ± 13	-56 ± 9	2016	Титов	около 3800

$ a_G $, мкс/г	α_G°	δ_G°	решение
6.66 ± 0.73	263.4 ± 2.1	-48.4 ± 1.2	глобальный, все сессии
5.60 ± 1.08	309.5 ± 4.3	-90.0 ± 2.0	локальный, все сессии
5.53 ± 0.90	266.4 ± 2.8	-47.7 ± 1.2	глобальный, хорошие сессии

- E. Skurikhina, S. Kurdubov, V. Gubanov, S. Mironova: IAA VLBI Analysis Center 2015–2016 Biennial Report // International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2015+2016 Biennial Report, 233-235 (2017)
- В. С. Губанов, С. Л. Курдубов, С. М. Миронова, И. Ф. Суркис: Учет структурной задержки при обработке РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН вып. 45, 43–50 (2018)
- Курдубов С. Л., Миронова С. М.: Уточнение ППН-параметра γ из обработки РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН, вып. 47, 43–52 (2018)
- Курдубов С. Л., Миронова С. М.: Определение постньютоновского параметра γ из обработки суточной РСДБ сессии // Известия ГАО в Пулкове, № 225: Труды Всероссийской астрометрической конференции «Пулково-2018», Санкт-Петербург, 25–28 (2018)
- Курдубов С. Л., Миронова С. М., Павлов Д. А.: Уточнение параметров гармоник внутрисуточных вариаций ПВЗ из результатов глобального уравнивания // Известия ГАО в Пулкове, № 225: Труды Всероссийской астрометрической конференции «Пулково-2018», Санкт-Петербург, 79–84 (2018)
- Курдубов С. Л., Миронова С. М. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ПМО "SINCOM" (2018)
- E. Skurikhina, S. Kurdubov, V. Gubanov, S. Mironova, A. Kudelkin: IAA VLBI Analysis Center 2017–2018 Biennial Report
- Sergei L Kurdubov, Dmitry A Pavlov, Svetlana M Mironova, Sergey A Kaplev: Earth–Moon very-long-baseline interferometry project: modelling of the scientific outcome // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 486, Issue 1, 815–822 (2019)
- Курдубов С. Л., Миронова С. М., Губанов В. С., Скурихина Е. А.: Построение уточненной версии небесной системы координат из глобальной обработки РСДБ-сессий 1979–2019 гг. // Труды ИПА РАН, вып. 50 (2019)
- «EWASS-2017» Sergei Kurdubov, Vadim Gubanov, Svetlana Mironova // STRUCTURE DELAY IN VLBI DATA PROCESSING
- «EWASS-2017» Sergei Kurdubov, Varvara Tanyukhina, Svetlana Mironova // STATISTICAL ANALYSIS OF VLBI GLOBAL SOLUTION RESIDUALS
- «EVGA-2017» E. Skurikhina, S. Kurdubov, V. Gubanov, S. Mironova // VLBI Analysis at the IAA
- «ВРК-2018» Курдубов С. Л., Миронова С. М. // Вычисление ковариационных функций для метода средней квадратической коллокации на часовых интервалах РСДБ-наблюдений
- «Пулково-2018» Курдубов С.Л., Миронова С.М. // Определение постньютоновского параметра γ из обработки суточной РСДБ сессии
- «Пулково-2018» Курдубов С.Л., Миронова С.М., Павлов Д.А. // Уточнение параметров гармоник внутрисуточных вариаций ПВЗ из результатов глобального уравнивания
- «EVGA-2019» Mironova S. M., Kurdubov S. L., Pavlov D. A., Nosov E. V. DIURNAL AND SUB-DIURNAL EOP VARIATIONS FROM VLBI GLOBAL SOLUTION
- «UAW 2019» Dmitry Pavlov et al., VLBI, LLR & GNSS Solutions at the Institute of Applied Astronomy RAS
- «КВНО-2019» Построение ряда UT1-UTC из комбинирования результатов обработки часовых РСДБ сессий по программе IVS Intensive, Курдубов С.Л., Миронова С.М., Гаязов И.С.
- «КВНО-2019» Оценивание ускорения Солнечной системы из глобального уравнивания РСДБ-наблюдений, Курдубов С. Л., Миронова С. М.
- «КВНО-2019» Определение ППН-параметра γ из различных суточных РСДБ сессий, Курдубов С. Л., Миронова С. М., Мельников А. Е.
- «КВНО-2019» Уточнение координат станций из комбинирования РСДБ, ГНСС и ЛЛС данных, Курдубов С. Л., Миронова С. М., Гаязов И. С.
- «КВНО-2019» Построение уточненной версии небесной системы координат из глобальной обработки РСДБ-сессий 1979-2019 года, Курдубов С. Л., Миронова С. М., Губанов В. С., Скурихина Е. А.
- «КВНО-2019» Определение параметров вращения Земли в ИПА РАН по наблюдениям различных сетей, Гаязов И. С., Губанов В. С., Курдубов С. Л., Скурихина Е. А., Суворкин В. В., Миронова С. М., Шарков В. С., Рец Я. П.

Спасибо за внимание!