

# Оценивание ускорения Солнечной системы из глобального уравнивания РСДБ-наблюдений



С. Л. Курдубов, С. М. Миронова

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

[kurdubov@iaaras.ru](mailto:kurdubov@iaaras.ru)

## Абстракт

Солнечная система вращается относительно центра Галактики с периодом приблизительно 200 млн. лет. Вследствие достаточно длительного интервала РСДБ-наблюдений возможно определить величину абберации и, следовательно, ускорение Солнечной системы. Рядом авторов было показано, что ускорение достигает порядка  $10^{-13}$  км с<sup>-2</sup>, например, в работе [1]. Начиная с 2010-х годов, рядом авторов были предприняты попытки получить величину и направление ускорения из глобального уравнивания РСДБ-наблюдений. Оценки модуля ускорения, полученные различными авторами и перечисленные в [2], совпадают по порядку, а направления различаются на единицы градусов по прямому восхождению и на десятки градусов по склонению. В данной работе была получена оценка ускорения Солнечной системы из глобального уравнивания РСДБ наблюдений программой QUASAR [3] за 1978-2019 г. Также были получены оценки скорости по каждой из рассматриваемых РСДБ-сессий. Было выяснено, начиная с какого количества наблюдений в сессии точность оценивания скорости Солнечной системы перестает значительно возрастать. После отбрасывания сессий с малым количеством наблюдений получена оценка ускорения как тренд скоростей.

## Вычисленные различными методами оценки ускорения Солнечной системы

Согласно современным представлениям, центр Галактики располагается в направлении объекта Стрелец А\*, экваториальные координаты которого равны  $266.4^\circ, -29.0^\circ$ .

Рядом авторов было выполнено оценивание расстояния от Солнца до центра Галактики. Согласно сводной таблице из [1], расстояния находятся в пределах 7-9 кпк. В табл. 1 приведены оценки расстояний и вычислены соответствующие скорости Солнечной системы в предположении, что гравитационная постоянная Солнца равна  $GM_{sun} = 1.3 \cdot 10^{20}$  м<sup>3</sup> с<sup>-2</sup>, а масса Галактики в пределах орбиты Солнца равна 1.5 млн масс Солнца.

Таблица 1: Оценки расстояния до центра Галактики и скорости Солнечной системы различными авторами

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

## Оценивание ускорения Солнечной системы методом РСДБ

Ускорение Солнечной системы может быть определено как один из параметров глобального уравнивания РСДБ наблюдений. В таблице 2 представлены оценки модуля ускорения Солнечной системы и его направления [2,5]. Направление задается двумя углами  $\alpha_G^\circ, \delta_G^\circ$  в экваториальной системе координат. Ускорение представлено в микросекундах дуги в год. В последнем столбце таблицы представлен один из параметров глобального решения – количество источников, позволяющий косвенно узнать то, насколько различались по количеству РСДБ-данных различные глобальные решения.

Таблица 2: Определение модуля и направления ускорения из глобальной обработки РСДБ наблюдений

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

## Оценивание скорости Солнечной системы из глобального уравнивания РСДБ-сессий

Проведено глобальное уравнивание РСДБ-сессий с 1979 по 2019 гг. В решении оказалось 11 млн задержек, 196 станций (со скачками), 4213 источников.

Определяемые параметры:

- Координаты и скорости станций (глобальные),
- Скорость и ускорение Земли (глобальные),
- ПВЗ (локальные),
- Тропосферная задержка с линейным трендом (локальные),
- Рассинхронизация часов с квадратичным трендом (локальные),
- Тропосферные градиенты (локальные).

Поправки к скорости Земли вычислялись в глобальном решении с помощью следующих формул:

$$\frac{\partial \tau}{\partial v_E} = \frac{(1+h) \left( (sb) \frac{v_E w}{c^2} - \frac{b}{c} \left( 1 + \frac{(sv_E)}{2c} \right) - \frac{(v_E b)u}{2c^2} \right)}{1+h} - \frac{\left( G - (sb)g - \frac{(v_E b)}{c} \left( 1 + \frac{(sv_E)}{2c} \right) \right)}{1+h} \quad (1)$$

$$h = \frac{(sv_E) + (sw)}{c} \quad (2)$$

$$g = 1 - (1-\gamma) \frac{GM_S}{|x_S|^2} - \frac{|v_E|^2}{2c^2} - \frac{(v_E w)}{c^2} \quad (3)$$

где  $\tau$  – задержка,  $v_E$  – вектор барицентрической скорости геоцентра,  $b$  – вектор базы в небесной системе координат,  $s$  – единичный вектор направления на источник в небесной системе координат,  $w$  – геоцентрическая скорость станции в небесной системе координат,  $GM_S$  – гравитационная постоянная для Солнца,  $x_S$  – геоцентрические координаты Солнца в небесной системе координат,  $c$  – скорость света,  $G$  – гравитационная постоянная. Круглые скобки вокруг двух векторов обозначают их скалярное произведение.

Компоненты ускорения представлены в табл. 3. Модуль ускорения получился равным  $6.66 \pm 0.73$  мкс/год. Направление:  $\alpha_G^\circ = 263.4 \pm 2.1, \delta_G^\circ = -48.4 \pm 1.2$ .

Таблица 3: Компоненты ускорения Солнечной системы из глобальной обработки РСДБ-наблюдений 1979-2019 гг.

компонента ускорения $i$	$a_{G_i}$ , км/с	$\Delta a_{G_i}$ км/с
x	$-0.28 \cdot 10^{-13}$	$0.08 \cdot 10^{-13}$
y	$-2.41 \cdot 10^{-13}$	$0.08 \cdot 10^{-13}$
z	$-2.16 \cdot 10^{-13}$	$0.17 \cdot 10^{-13}$

## Оценивание скорости Солнечной системы из одиночных РСДБ-сессий

Было построено глобальное решение, в котором скорость Земли определялась как локальный параметр. В получившийся ряд скоростей был вписан полином, одна из компонент которого является ускорением. До вписывания полинома из ряда скоростей были отброшены скорости по критерию трех сигм.

X компонента скорости и ее формальная ошибка в зависимости от времени в формате модифицированной юлианской даты представлены на рис. 1. Зависимость модулей скоростей от времени представлена на рис. 2.

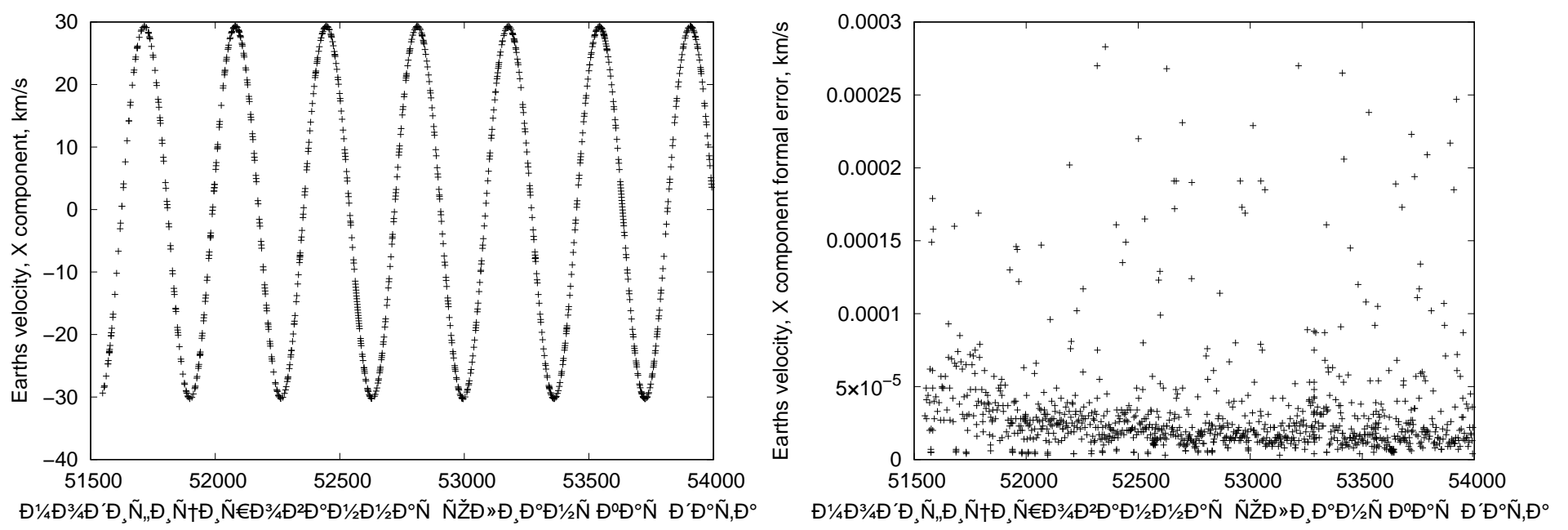


Рис. 1: X компонента скорости Солнечной системы (слева), ее формальная ошибка (справа) в зависимости от даты наблюдения

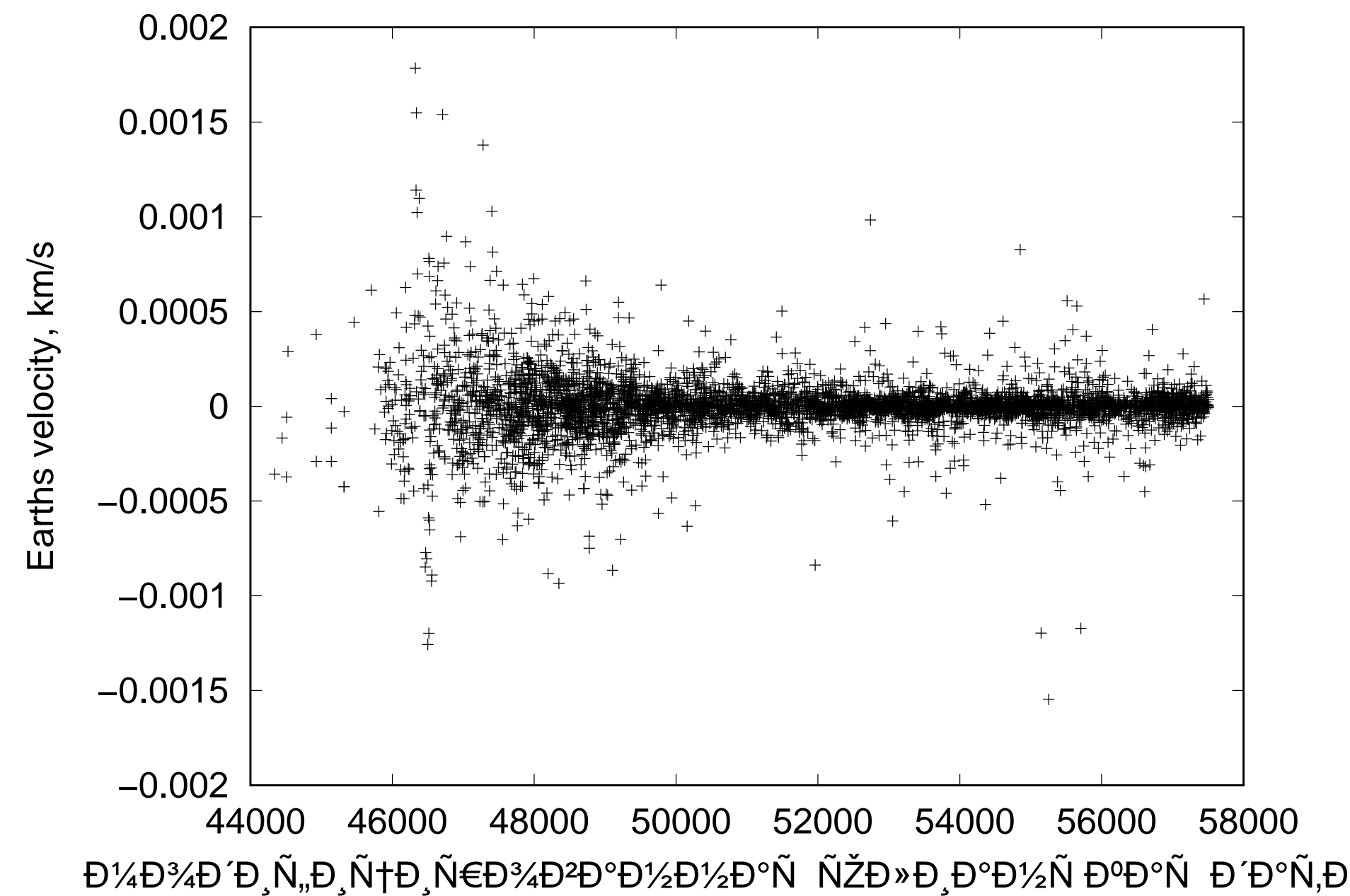


Рис. 2: Модуль скорости Солнечной системы в зависимости от даты наблюдения

Компоненты ускорения представлены в табл. 4.

Таблица 4: Ускорение Солнечной системы из глобальной обработки, скорость Земли определялась для каждой сессии отдельно

компонента ускорения $i$	$a_{G_i}$ , км/с	$\Delta a_{G_i}$ км/с
x	$0.14 \cdot 10^{-13}$	$0.15 \cdot 10^{-13}$
y	$-2.11 \cdot 10^{-13}$	$0.15 \cdot 10^{-13}$
z	$-1.73 \cdot 10^{-13}$	$0.23 \cdot 10^{-13}$

Модуль ускорения получился равным  $5.60 \pm 1.08$  мкс/год. Направление:  $\alpha_G^\circ = 309.5 \pm 4.3, \delta_G^\circ = -90.0 \pm 2.0$ .

## Оценивание ускорения Солнечной системы из глобального уравнивания уменьшенного набора РСДБ-сессий

Для оценивания ускорения Солнечной системы из глобального уравнивания уменьшенного набора РСДБ-сессий из решения были исключены сессии, оценка скорости Земли как суточного параметра для которых оказалась больше 10 м/с. Результаты оценивания представлены в табл. 5. Модуль ускорения получился равным  $5.53 \pm 0.90$  мкс/год. Направление:  $\alpha_G^\circ = 266.4 \pm 2.8, \delta_G^\circ = -47.7 \pm 1.2$ .

Таблица 5: Компоненты ускорения Солнечной системы из глобальной обработки ограниченного РСДБ-наблюдений 1979-2019 гг

компонента ускорения $i$	$a_{G_i}$ , км/с	$\Delta a_{G_i}$ км/с
x	$0.14 \cdot 10^{-13}$	$0.10 \cdot 10^{-13}$
y	$-2.16 \cdot 10^{-13}$	$0.10 \cdot 10^{-13}$
z	$-2.38 \cdot 10^{-13}$	$0.20 \cdot 10^{-13}$

## Заключение

Получена оценка ускорения Солнечной системы как глобального и локального параметра из обработки РСДБ-сессий с 1979 по 2019 гг (табл. 6). Оценки модуля и направления находятся в пределах оценки других авторов (табл. 2). Произведен анализ полученных из обработки одиночных РСДБ-сессий оценок скоростей Солнечной системы.

Таблица 6: Определение модуля и направления ускорения из глобальной обработки РСДБ наблюдений программным комплексом QUASAR

решение	$ a_G $ , мкс/г	$\alpha_G^\circ$	$\delta_G^\circ$
глобальный, все сессии	$6.66 \pm 0.73$	$263.4 \pm 2.1$	$-48.4 \pm 1.2$
локальный, все сессии	$5.60 \pm 1.08$	$309.5 \pm 4.3$	$-90.0 \pm 2.0$
глобальный, хорошие сессии	$5.53 \pm 0.90$	$266.4 \pm 2.8$	$-47.7 \pm 1.2$

## Список литературы

- Zakamska N. L., Tremaine S. Constraints on the acceleration of the solar system from high-precision timing // The Astronomical Journal — 2005. — Vol. 130. — P. 1939–1950.
- Titov O., Krásná H. Measurement of the solar system acceleration using the Earth scale factor // A&A. — 2018.
- Курдубов С. Л., Губанов В. С. Основные результаты глобального уравнивания РСДБ-наблюдений // Письма в астрономический журнал — 2011. — Vol. 37 — №4 — P. 294–302.
- E. Griv, M. Gedalin, Ing-Guey Jiang The distance to the Galactic centre: globular clusters and SEKBO RR Lyrae survey stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society — 2019. — Vol. 484. — P. 218–225.
- S. Kurdubov Estimation of Solar System acceleration from VLBI // Transactions of IAA RAS — 2010. — Vol. 21 — P. 240–242.