

УДК 521.9

О ТОЧНОСТИ ТЕОРИИ ПРЕЦЕССИИ И НУТАЦИИ

© 2014 г. З. М. Малкин*

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 26.08.2013 г.; принята в печать 23.12.2013 г.

Вычислены поправки к параметрам теории прецессии и нутации IAU 2000/2006 по пяти различным рядам — двум индивидуальным и трем сводным, обычно используемым в литературе для этой цели. Сравнение наборов поправок, полученных по разным данным, показало, что между ними существуют значительные систематические различия, зачастую многократно превышающие случайные ошибки их определения. В то же время в существующих работах обычно используются данные, полученные по одному или двум рядам, выбранным авторами без специального обоснования. Результаты проведенного исследования показывают, что при уточнении теории прецессии и нутации необходимо рассматривать и сопоставлять различные имеющиеся ряды РСДБ-данных для уменьшения систематической ошибки улучшенной модели.

DOI: 10.7868/S0004629914060048

1. ВВЕДЕНИЕ

Современная теория вращения Земли, в частности, модель прецессии и нутации, строится в два этапа. На первом создается теоретическая модель, построенная на основе имеющихся знаний о строении Земли, геофизических процессах в ее оболочках, движении небесных тел, влияющих на вращении Земли и т.д. (см., например, [1–3]). Однако этих знаний недостаточно для построения теории вращения Земли с требуемой в настоящее время микросекундной точностью. Поэтому ряд основных параметров прецессии и нутации подлежит уточнению из наблюдений, как это было сделано и для последней официальной теории прецессии и нутации Международного астрономического союза IAU 2000/2006 [4, 5].

С 1980-х гг. в качестве наблюдательных данных используются ряды координат небесного полюса, получаемые методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Фактически, по результатам обработки РСДБ-наблюдений вычисляются и публикуются не сами координаты небесного полюса, а поправки к принятой модели прецессии и нутации, называемые смещением небесного полюса (CPO, Celestial Pole Offset) dX и dY [6].

Исходные ряды CPO вычисляются центрами анализа Международной службы РСДБ для гео-

дезии и астрометрии IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, [7]). Кроме того, публикуются сводные ряды CPO, вычисляемые в центрах IVS и Международной службы вращения Земли и опорных систем координат IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) [8]. Таким образом, для работ по уточнению теории прецессии и нутации доступны более десятка рядов CPO. Их сравнительное исследование, проведенное в [9], показало, что между ними существуют значительные систематические и случайные различия. Эти различия неизбежно влияют на точность определяемых из наблюдений параметров модели прецессии и нутации и обуславливают их зависимость от используемых рядов CPO. Настоящая работа посвящена исследованию этого вопроса.

2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Ряды CPO первоначально вычисляются в центрах анализа IVS непосредственно из обработки РСДБ-наблюдений. Они содержат значения CPO dX и dY для каждой 24-часовой РСДБ-сессии на момент середины сессии, в среднем около трех эпох в неделю. Такие ряды будем называть индивидуальными. Хотя всеми центрами используются одни и те же наблюдения сети станций IVS, результаты могут различаться весьма существенно из-за разного используемого программного обеспечения и различий в методике обработки [9].

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

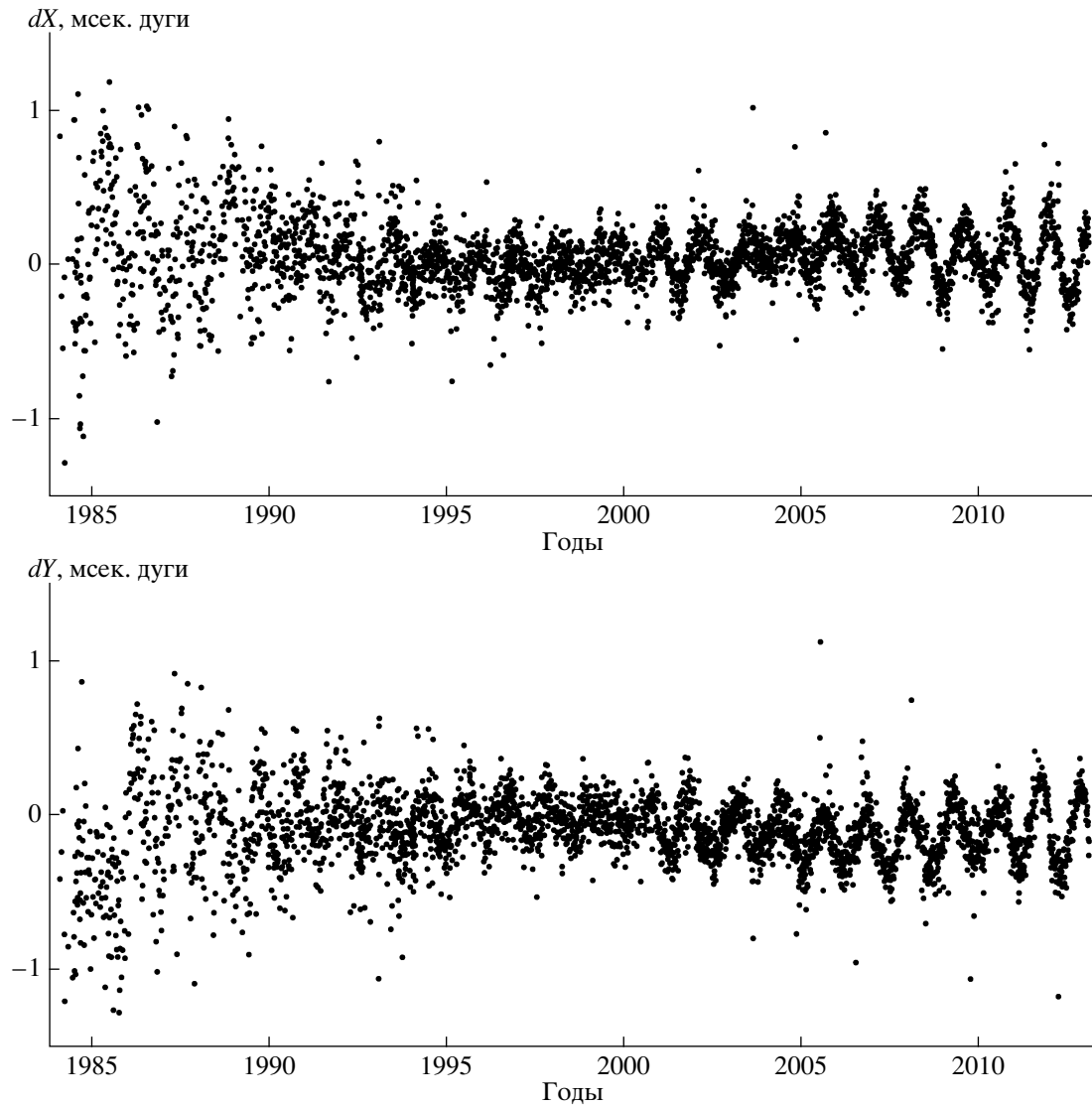


Рис. 1. Ряд CPO IVS.

Всего доступны девять индивидуальных рядов CPO¹. Однако только шесть рядов обеспечивают строгое вычисление поправок к модели IAU 2000/2006. Из них для целей настоящей работы были выбраны два ряда, включающие значения CPO относительно модели IAU 2003/2006 и использовавшиеся в работах по созданию модели IAU 2000/2006 [4, 5]: ряды CPO GCFC и NEOS. Оба ряда вычисляются с использованием программного пакета Calc/Solve в Центре космических полетов им. Годдарда НАСА (NASA Goddard Space Flight Center) и Морской обсерватории США (U.S. Naval Observatory), соответственно.

Далее индивидуальные ряды используются в

¹ <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/vlbi/ivsproducts/eops/>

центрах сводной обработки для получения сводных решений. Основными сводными рядами CPO являются: ряд IERS/C04 [10], ряд IERS/NEOS [11] и ряд IVS [12]. Ряд IVS, также как индивидуальные ряды, содержит значения CPO для отдельных РСДБ-сессий на их средние эпохи. Число использованных сессий в этом ряде меньше, чем в индивидуальных рядах — в среднем около 2.5 в неделю. Ряды IERS вычисляются на каждый день на момент 0^h всемирного времени. При этом для вычисления рядов C04 и NEOS используются различные наборы индивидуальных рядов и разные методы вычисления сводного решения.

Составляющие dX и dY ряда CPO IVS приведены на рис. 1. На рисунке видно, что основными составляющими ряда CPO являются квазигармоническое колебание с периодом около 430 сут с

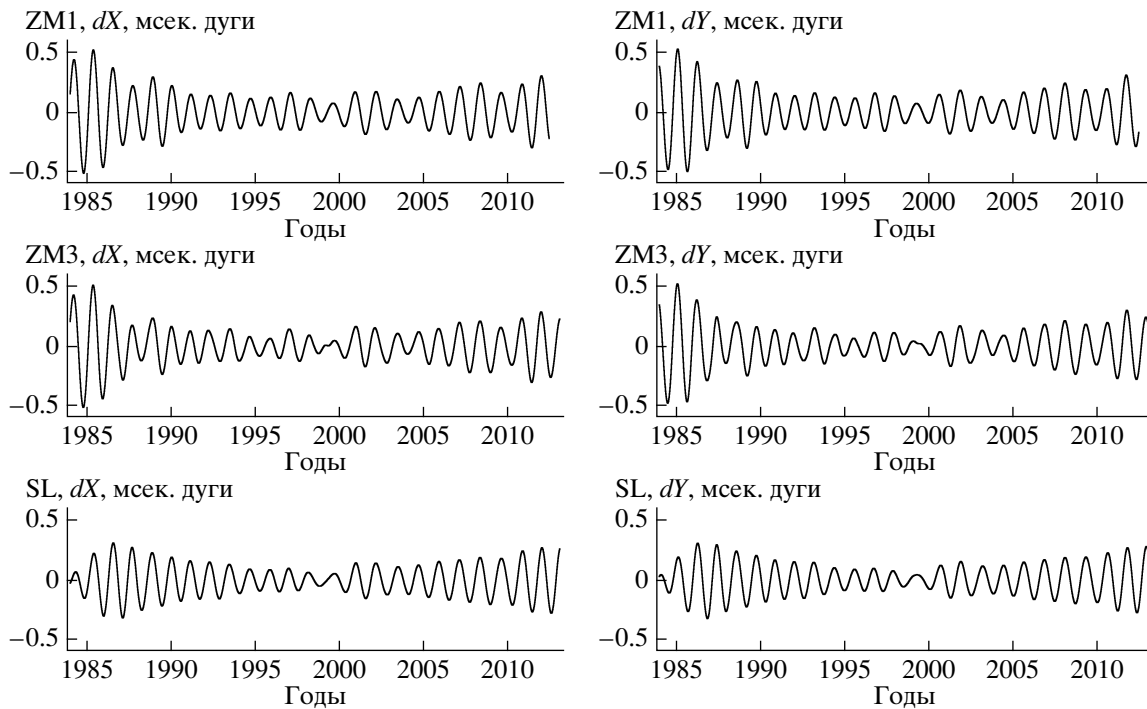


Рис. 2. Ряды FCN.

переменной амплитудой, относящиеся к свободной нутации земного ядра (FCN, Free Core Nutation), и сигнал с периодом 18.6 года, обусловленный ошибками модели главного члена нутации.

Что касается сигнала FCN, он имеет переменную амплитуду и фазу (см., например, [13]) и по этой причине не является частью модели прецессии и нутации, а подлежит определению из наблюдений. В то же время он является наиболее значительной немоделируемой составляющей СРО, значительно превышающей по амплитуде возможные ошибки коэффициентов модели нутации. Поэтому сигнал FCN подлежит исключению из ряда СРО до вычисления поправок к модели IAU 2000/2006.

К настоящему времени разработаны и поддерживаются в актуальном состоянии три модели FCN, доступные в числовом виде: модели автора ZM1 и ZM3, а также модель Ламбера (Lambert) (см. работу [6]). Их детальное описание приведено в [13–15]. Там же проведено сравнение моделей, которое показало, что между ними имеются различия, хотя в целом и не очень большие. Они обусловлены разными исходными рядами СРО для вычисления модели FCN и методами вычислений. Разница между моделями FCN велика только для 1980-х гг., когда результаты определений СРО имели еще сравнительно низкую точность в случайном и, что более существенно, в систематическом отношении, как видно на рис. 1. Для периода

после примерно 1990 г. существенных систематических различий между моделями не наблюдается. Все три ряда FCN показаны на рис. 2. Ряд ZM1 короче двух других рядов, поскольку при его вычислении используется вейвлет-преобразование, обладающее значительным краевым эффектом. Поэтому последние полтора года из ряда ZM1 удаляются, как ненадежные.

В настоящей работе был использован ряд FCN ZM3², вычисляемый автором методом, близким к методу Ламбера. Сравнение трех моделей, проведенное в предыдущих работах, позволяет предпочесть эту модель, поскольку она основана на наиболее точном ряде СРО IVS, а также обеспечивает наиболее детальное представление поведения FCN со временем [15]. Вклад FCN в ряды СРО по модели ZM3 вычисляется следующим образом. В качестве исходного ряда СРО взят ряд IVS. Вычисления параметров FCN производятся по скользящим интервалам длительностью около одного периода FCN (431 средние сутки) со сдвигом в один день. На каждом интервале составляется система условных уравнений вида:

$$dX = A_c \cos \varphi - A_s \sin \varphi + X_0, \quad (1)$$

$$dY = A_c \sin \varphi + A_s \cos \varphi + Y_0,$$

где dX , dY — наблюдаемые значения СРО (используется ряд IVS), $\varphi = \frac{2\pi}{P}(t - t_0)$, P — номи-

² <http://www.gao.spb.ru/english/as/persac/>

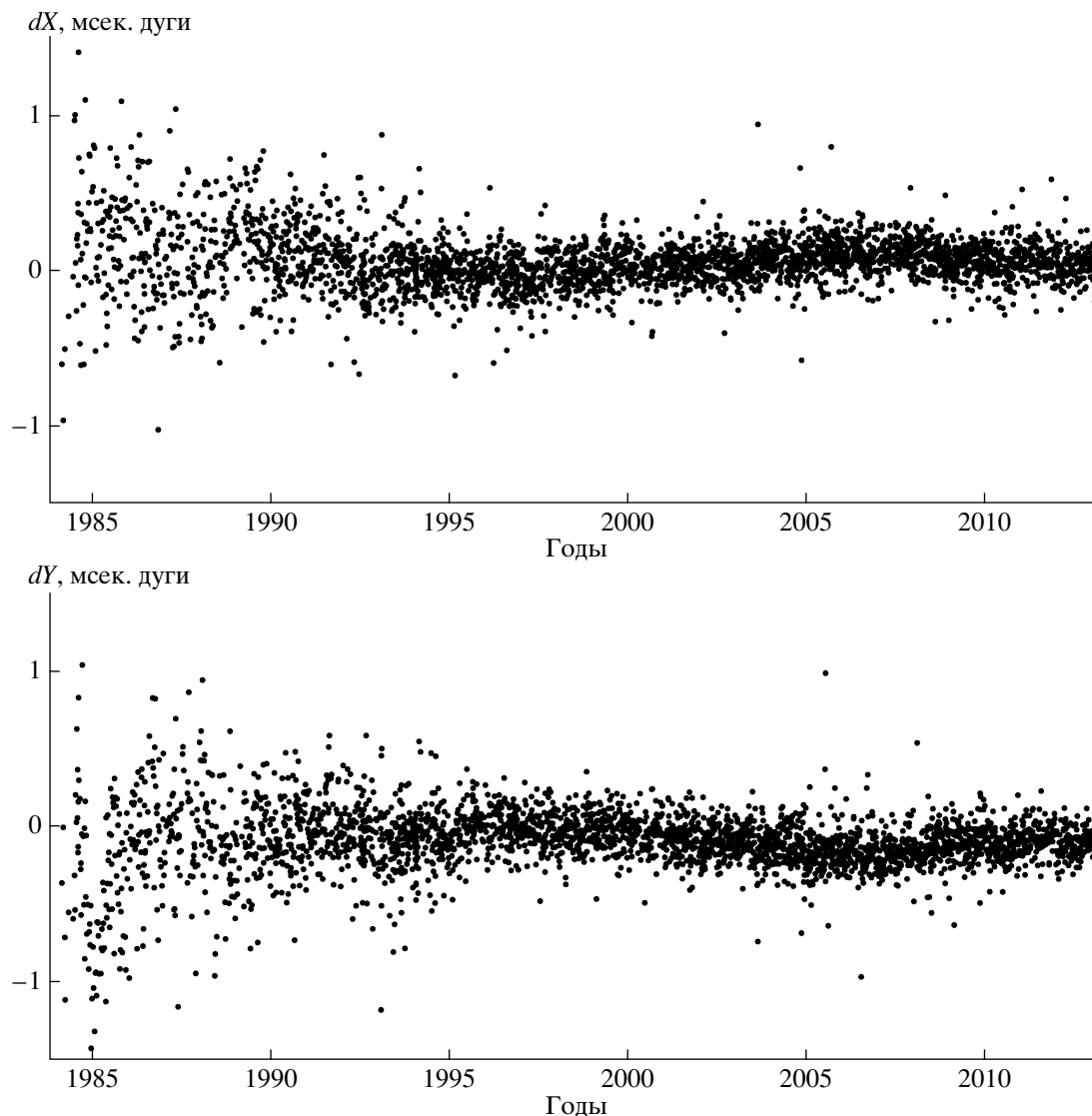


Рис. 3. Ряд CPO IVS после исключения FCN.

нальный период FCN, принятый равным -430.21 средних суток, $t_0 = 2000.0$. Одно уравнение соответствует одной сессии РСДБ-наблюдений со средним моментом наблюдений t . Веса условных уравнений обратно пропорциональны квадрату ошибок CPO.

Из этой системы уравнений методом наименьших квадратов вычисляются параметры модели FCN A_c , A_s , X_0 и Y_0 на середину текущего интервала. При сдвиге скользящего интервала в один день значения параметров также получаются с суточным интервалом. Величина FCN на произвольную эпоху может быть получена по формулам, аналогичным (1), только без учета смещений X_0 и Y_0 , с интерполяцией значений A_c и A_s на требуемый момент (практически, достаточно брать значения

параметров на начало суток, содержащих эпоху, на которую вычисляется вклад FCN).

Ряд CPO IVS после исключения вклада FCN по модели ZM3 (ряд CPO-FCN) показан на рис. 3. Эта же модель FCN была вычтена из других рядов CPO, обработанных в настоящей работе. Графики рядов CPO и CPO-FCN других центров выглядят аналогично, хотя детальный анализ показывает, что между рядами существуют значительные отличия [14, 16]. Поэтому использование разными авторами разных рядов для уточнения модели прецессии и нутации может приводить к различиям в получаемых результатах, что будет исследовано в следующем разделе.

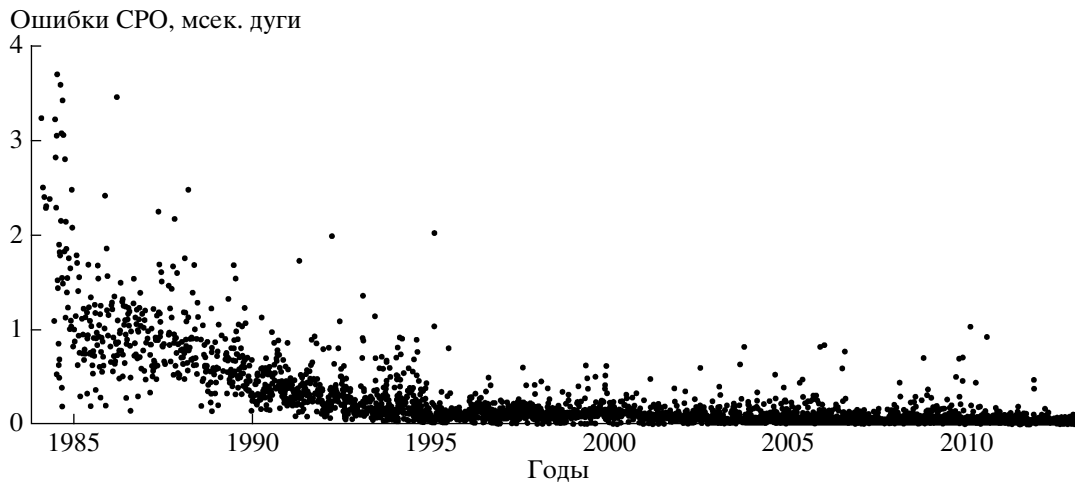


Рис. 4. Ошибки ряда СРО IVS.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВОК К МОДЕЛИ IAU 2000/2006

В соответствии с целями настоящей работы были вычислены поправки к модели прецессии и нутации IAU 2000/2006 по всем пяти рядам СРО—FCN, описанным в предыдущем разделе. При этом совместно определялись поправки к параметрам прецессии в виде квадратичного члена и амплитудам семи наибольших нутационных гармоник. Данные СРО—FCN взвешивались с весами, обратно пропорциональными квадрату их ошибок. Кроме использования пяти различных рядов СРО также исследовалась зависимость определяемых поправок к теории прецессии и нутации от использованного интервала наблюдений.

Как уже отмечалось выше, данные за период до примерно 1990 г. сравнительно немногочисленны, имеют большой разброс и, возможно, большие систематические ошибки, особенно для dY . Однородные данные начинаются с начала 1990-х гг., что подтверждается также анализом случайных ошибок СРО, представленных на рис. 4. Все эти особенности присутствуют и в других сериях СРО. Поэтому можно рассматривать три возможные даты начала периода наблюдений для использования при определении поправок к модели прецессии и нутации.

Первая эпоха 1984.0 соответствует началу ряда IVS. Как было показано выше, данные до 1990 г. имеют сравнительно низкую точность, как случайную, так и систематическую. Поэтому мы считаем нецелесообразным их использование для исследования тонких эффектов во вращении Земли. Однако они часто используются как дата начала интервала РСДБ-данных для различных астрономических и геодезических исследований. Поэтому

мы рассмотрели этот вариант, чтобы оценить возможное влияние ранних наблюдений 1984—1990 гг. на результаты. Эпоха 1990.0 также начинает использоваться в последние годы как начало периода более точных и однородных РСДБ-данных. Различие в параметрах прецессии (линейный член) при использовании РСДБ-данных с этими двумя начальными датами отмечалось еще в [17]. Последняя эпоха 1993.0, соответствующая началу периода наиболее качественных современных РСДБ-данных, использована впервые. Как можно видеть на рис. 4, примерно с этой эпохи начинается современный период стабильно высокой точности результатов определения СРО.

Таким образом, в настоящей работе все вычисления были выполнены с тремя интервалами данных, определяемыми тремя рассмотренными начальными датами. Это позволяет, в частности, оценить возможные систематические расхождения между результатами разных авторов, использованных интервалов РСДБ-наблюдений, начиная с эпох 1984.0 и 1990.0. Конечная дата интервала наблюдений во всех трех случаях равна 2013.1.

Важно отметить, что если бы данные для периода до начала 1990-х гг. отличались от последующих только большими случайными ошибками определения координат небесного полюса, их включение могло быть полезным для определения поправки к постоянной прецессии и долгопериодических членов нутации вследствие увеличения длины ряда, что является важным фактором повышения точности определения параметров тренда и гармоник с периодами, сопоставимыми с длиной ряда. В случае же наличия систематических ошибок ранних наблюдений, их включение может привести к систематическим ошибкам результатов. При этом применение взвешивания значений СРО в соответствии с их ошибками, не может полностью компенсировать

Таблица 1. Максимальная корреляция между параметрами прецессии и нутации (абсолютные значения). Для синусных и косинусных коэффициентов указан период соответствующего нутационного члена. В каждой клетке таблицы приведены сверху вниз данные для начальных эпох 1984.0, 1990.0 и 1993.0, соответственно

| | Линейная модель прецессии | | | | | Квадратичная модель прецессии | | | | | |
|-----------|---------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|
| | p_0 | p_1 | sin(6798) | cos(6798) | sin(3399) | p_0 | p_1 | p_2 | sin(6798) | cos(6798) | sin(3399) |
| p_1 | 0.77 | | | | | 0.48 | | | | | |
| | 0.78 | | | | | 0.63 | | | | | |
| | 0.90 | | | | | 0.84 | | | | | |
| p_2 | | | | | | 0.80 | 0.90 | | | | |
| | | | | | | 0.87 | 0.94 | | | | |
| | | | | | | 0.93 | 0.97 | | | | |
| sin(6798) | 0.30 | 0.36 | | | | 0.71 | 0.84 | 0.91 | | | |
| | 0.25 | 0.29 | | | | 0.81 | 0.90 | 0.95 | | | |
| | 0.32 | 0.37 | | | | 0.88 | 0.96 | 0.98 | | | |
| cos(6798) | 0.52 | 0.75 | 0.20 | | | 0.66 | 0.38 | 0.70 | 0.51 | | |
| | 0.41 | 0.75 | 0.24 | | | 0.74 | 0.51 | 0.80 | 0.66 | | |
| | 0.65 | 0.85 | 0.31 | | | 0.85 | 0.72 | 0.83 | 0.76 | | |
| sin(3399) | 0.31 | 0.49 | 0.48 | 0.40 | | 0.49 | 0.24 | 0.42 | 0.37 | 0.54 | |
| | 0.31 | 0.49 | 0.46 | 0.40 | | 0.55 | 0.39 | 0.58 | 0.36 | 0.58 | |
| | 0.38 | 0.53 | 0.39 | 0.44 | | 0.70 | 0.62 | 0.69 | 0.60 | 0.71 | |
| cos(3399) | 0.24 | 0.26 | 0.14 | 0.36 | 0.10 | 0.49 | 0.44 | 0.52 | 0.47 | 0.58 | 0.14 |
| | 0.26 | 0.37 | 0.21 | 0.41 | 0.10 | 0.59 | 0.56 | 0.60 | 0.58 | 0.65 | 0.24 |
| | 0.38 | 0.43 | 0.13 | 0.48 | 0.19 | 0.73 | 0.75 | 0.80 | 0.80 | 0.60 | 0.34 |

этот эффект. Таким образом, приходится искать компромисс между длиной ряда и точностью используемых данных наблюдений. Сопоставление результатов, полученных по разным периодам наблюдений, помогает изучить влияние ранних наблюдений и получить представление о реальной ошибке теории прецессии и нутации МАС.

Для определения поправок к модели нутации были выбраны семь основных членов с периодами 6798.38, 3399.19, 365.26, 182.62, 121.75, 27.55 и 13.66 сут — всего 14 определяемых параметров (амплитуды синусного и косинусного члена для каждой гармоники). Поправки к модели прецессии вычислялись одновременно с поправками к модели нутации в двух вариантах: линейная модель $p_0 + p_1(t - t_0)$ и квадратичная модель $p_0 + p_1(t - t_0) + p_2(t - t_0)^2$, где t — время в годах, $t_0 = 2000.0$. Величина p_0 представляет собой сдвиг положения небесного полюса на эпоху 2000.0, а p_1 является поправкой к скорости прецессии. Таким образом, для каждого ряда СРО–FCN были получены 6 решений: решения с линейной и квадратичной

моделью поправок к модели прецессии (вместе с нутацией 16 и 17 параметров, соответственно) для трех эпох начала интервала наблюдений.

Вследствие ограниченности интервала наблюдений можно ожидать большой корреляции между коэффициентами модели прецессии и долгопериодических членов нутации, что уже отмечалось в предыдущих исследованиях, например, [18]. Мы провели более детальный анализ корреляций по нашим данным. В табл. 1 приведены максимальные значения коэффициента корреляций между параметрами модели прецессии и двумя самыми долгопериодическими членами нутации по всем пяти рядам. Корреляции с более высокочастотными членами модели нутации малы, и они в таблице не приводятся. Как и можно было ожидать, с уменьшением интервала данных корреляции между определяемыми параметрами растут, особенно между линейными и квадратичными коэффициентами прецессии и коэффициентами прецессии и нутации с периодом 6798 сут. Для квадратичной модели поправок к параметрам прецессии плохо

Таблица 2. Поправки к параметрам прецессии

| Ряд | T_1 | p_0 мксек. дуги | p_1 мксек. дуги/год | p_0 мксек. дуги | p_1 мксек. дуги/год | p_2 мксек. дуги/год ² |
|---------|-------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| dX | | | | | | |
| GSF | 1984 | $+41.8 \pm 2.0$ | $+1.05 \pm 0.31$ | $+21.1 \pm 3.0$ | -1.04 ± 0.39 | $+0.62 \pm 0.07$ |
| | 1990 | $+35.6 \pm 2.1$ | $+2.42 \pm 0.34$ | $+32.3 \pm 4.0$ | $+1.83 \pm 0.70$ | -0.12 ± 0.13 |
| | 1993 | $+37.6 \pm 2.5$ | $+1.93 \pm 0.47$ | $+19.7 \pm 6.3$ | -4.57 ± 2.12 | $+0.96 \pm 0.31$ |
| USN | 1984 | $+32.6 \pm 1.9$ | $+1.92 \pm 0.35$ | $+24.2 \pm 2.9$ | $+1.31 \pm 0.35$ | $+0.24 \pm 0.06$ |
| | 1990 | $+30.2 \pm 2.0$ | $+2.48 \pm 0.68$ | $+27.5 \pm 4.1$ | $+2.02 \pm 0.68$ | $+0.10 \pm 0.13$ |
| | 1993 | $+31.6 \pm 2.5$ | $+2.12 \pm 2.17$ | $+14.5 \pm 6.7$ | -3.67 ± 2.17 | $+0.89 \pm 0.32$ |
| IVS | 1984 | $+27.1 \pm 2.6$ | $+1.89 \pm 0.31$ | $+14.1 \pm 4.0$ | -2.15 ± 1.06 | $+0.63 \pm 0.15$ |
| | 1990 | $+26.3 \pm 2.8$ | $+2.05 \pm 0.35$ | $+12.3 \pm 4.9$ | -2.90 ± 1.49 | $+0.74 \pm 0.21$ |
| | 1993 | $+26.9 \pm 3.1$ | $+1.92 \pm 0.50$ | -0.5 ± 6.1 | 11.24 ± 2.61 | $+1.76 \pm 0.34$ |
| C04 | 1984 | $+36.2 \pm 2.4$ | $+1.18 \pm 0.32$ | $+30.8 \pm 3.9$ | $+1.10 \pm 0.32$ | $+0.10 \pm 0.06$ |
| | 1990 | $+34.5 \pm 2.8$ | $+1.50 \pm 0.40$ | $+23.9 \pm 5.3$ | $+0.40 \pm 0.61$ | $+0.29 \pm 0.12$ |
| | 1993 | $+28.8 \pm 4.7$ | $+2.56 \pm 0.82$ | $+21.4 \pm 6.8$ | -2.30 ± 3.31 | $+0.59 \pm 0.39$ |
| NEOS | 1984 | -26.0 ± 1.5 | $+3.49 \pm 0.18$ | -19.6 ± 2.1 | $+3.27 \pm 0.19$ | -0.11 ± 0.03 |
| | 1990 | -26.7 ± 1.1 | $+3.62 \pm 0.16$ | -39.1 ± 2.0 | $+1.85 \pm 0.29$ | $+0.43 \pm 0.06$ |
| | 1993 | -25.6 ± 1.2 | $+3.34 \pm 0.22$ | -69.0 ± 3.1 | 10.67 ± 0.95 | $+2.19 \pm 0.14$ |
| Среднее | | $+3.6 \pm 8.0$ | $+2.73 \pm 0.26$ | -5.5 ± 8.7 | $+1.58 \pm 0.60$ | $+0.15 \pm 0.11$ |
| dY | | | | | | |
| GSF | 1984 | -89.0 ± 2.0 | -1.42 ± 0.31 | -94.3 ± 3.1 | -1.95 ± 0.39 | $+0.16 \pm 0.07$ |
| | 1990 | -91.2 ± 2.1 | -0.96 ± 0.36 | -87.7 ± 4.1 | -0.34 ± 0.72 | -0.13 ± 0.13 |
| | 1993 | -92.8 ± 2.6 | -0.58 ± 0.49 | -55.2 ± 6.3 | $+13.17 \pm 2.17$ | -2.03 ± 0.31 |
| USN | 1984 | -81.2 ± 2.0 | -1.46 ± 0.32 | -75.4 ± 3.0 | -1.07 ± 0.35 | -0.16 ± 0.06 |
| | 1990 | -80.0 ± 2.1 | -1.74 ± 0.37 | -80.8 ± 4.3 | -1.88 ± 0.71 | $+0.03 \pm 0.14$ |
| | 1993 | -83.4 ± 2.6 | -0.89 ± 0.52 | -41.8 ± 6.9 | $+13.31 \pm 2.24$ | -2.17 ± 0.33 |
| IVS | 1984 | -77.1 ± 2.6 | -3.20 ± 0.47 | -65.6 ± 4.0 | $+0.31 \pm 1.02$ | -0.55 ± 0.14 |
| | 1990 | -76.9 ± 2.8 | -3.26 ± 0.50 | -60.3 ± 4.8 | $+2.57 \pm 1.47$ | -0.87 ± 0.21 |
| | 1993 | -75.7 ± 3.2 | -3.52 ± 0.58 | -47.4 ± 6.1 | $+10.52 \pm 2.64$ | -1.86 ± 0.34 |
| C04 | 1984 | -86.0 ± 2.0 | -0.98 ± 0.28 | -78.8 ± 3.4 | -0.93 ± 0.28 | -0.13 ± 0.05 |
| | 1990 | -84.2 ± 2.3 | -1.25 ± 0.35 | -101.9 ± 4.5 | -3.10 ± 0.53 | $+0.49 \pm 0.11$ |
| | 1993 | -98.1 ± 3.9 | $+1.44 \pm 0.69$ | -90.3 ± 5.9 | $+6.11 \pm 2.72$ | -0.58 ± 0.33 |
| NEOS | 1984 | -89.1 ± 1.9 | -5.50 ± 0.19 | -94.0 ± 2.8 | -5.48 ± 0.19 | $+0.07 \pm 0.03$ |
| | 1990 | -96.6 ± 1.7 | -5.15 ± 0.18 | -118.0 ± 2.7 | -7.59 ± 0.30 | $+0.59 \pm 0.06$ |
| | 1993 | -11.25 ± 1.9 | -2.70 ± 0.25 | -97.5 ± 3.4 | $+2.40 \pm 1.09$ | -0.73 ± 0.15 |
| Среднее | | -88.9 ± 2.6 | -3.08 ± 0.52 | -87.1 ± 5.1 | -3.60 ± 0.81 | $+0.04 \pm 0.09$ |

Таблица 3. Поправки к амплитудам нутационных членов, определенные совместно с линейной моделью поправок прецессии, в мксек. дуги

| Ряд | T_1 | Период гармоника, сут | | | | | | |
|---------|----------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | 6798.38 | 3399.19 | 365.26 | 182.62 | 121.75 | 27.55 | 13.66 |
| dX | | | | | | | | |
| GSF | 1984 | 63.7 ± 2.6 | 8.6 ± 2.3 | 3.7 ± 2.2 | 12.0 ± 2.2 | 1.6 ± 2.2 | 21.2 ± 2.2 | 24.3 ± 2.2 |
| | 1990 | 54.8 ± 2.8 | 9.7 ± 2.4 | 2.2 ± 2.2 | 11.8 ± 2.3 | 1.9 ± 2.2 | 21.4 ± 2.2 | 24.3 ± 2.2 |
| | 1993 | 57.3 ± 3.3 | 7.9 ± 2.6 | 2.9 ± 2.3 | 11.6 ± 2.4 | 2.2 ± 2.4 | 21.3 ± 2.4 | 24.4 ± 2.3 |
| USN | 1984 | 50.0 ± 2.5 | 4.7 ± 2.3 | 6.3 ± 2.2 | 10.7 ± 2.2 | 1.9 ± 2.2 | 16.5 ± 2.2 | 27.0 ± 2.2 |
| | 1990 | 46.5 ± 2.7 | 5.5 ± 2.3 | 5.2 ± 2.3 | 11.3 ± 2.3 | 2.0 ± 2.3 | 16.4 ± 2.3 | 26.8 ± 2.3 |
| | 1993 | 48.3 ± 3.2 | 4.4 ± 2.6 | 6.0 ± 2.4 | 11.2 ± 2.5 | 2.6 ± 2.5 | 16.4 ± 2.4 | 26.3 ± 2.4 |
| IVS | 1984 | 54.8 ± 3.0 | 9.4 ± 2.5 | 1.7 ± 2.2 | 6.3 ± 2.2 | 6.9 ± 2.2 | 17.3 ± 2.1 | 18.3 ± 2.2 |
| | 1990 | 54.0 ± 3.2 | 9.8 ± 2.7 | 1.9 ± 2.3 | 6.3 ± 2.3 | 6.8 ± 2.3 | 17.3 ± 2.3 | 18.2 ± 2.3 |
| | 1993 | 54.5 ± 3.6 | 9.3 ± 2.9 | 1.8 ± 2.4 | 6.1 ± 2.4 | 7.1 ± 2.4 | 17.3 ± 2.4 | 18.2 ± 2.4 |
| C04 | 1984 | 52.4 ± 2.8 | 16.1 ± 2.4 | 8.1 ± 2.0 | 10.2 ± 2.1 | 6.4 ± 2.0 | 27.1 ± 2.0 | 24.5 ± 1.9 |
| | 1990 | 51.4 ± 3.1 | 16.4 ± 2.6 | 8.6 ± 2.2 | 11.3 ± 2.2 | 6.2 ± 2.1 | 27.2 ± 2.1 | 24.2 ± 2.1 |
| | 1993 | 48.8 ± 3.8 | 17.7 ± 3.0 | 8.9 ± 2.3 | 12.8 ± 2.3 | 6.8 ± 2.2 | 27.3 ± 2.2 | 24.4 ± 2.2 |
| NEOS | 1984 | 35.6 ± 2.1 | 21.1 ± 2.0 | 28.4 ± 1.9 | 16.4 ± 2.0 | 7.7 ± 1.9 | 14.9 ± 1.9 | 34.9 ± 1.9 |
| | 1990 | 31.9 ± 1.4 | 20.7 ± 1.4 | 16.5 ± 1.3 | 16.5 ± 1.3 | 4.0 ± 1.3 | 17.7 ± 1.3 | 28.0 ± 1.3 |
| | 1993 | 33.0 ± 1.5 | 20.7 ± 1.4 | 18.0 ± 1.3 | 16.4 ± 1.3 | 4.1 ± 1.3 | 16.2 ± 1.3 | 29.1 ± 1.3 |
| Среднее | 43.9 ± 2.9 | 14.2 ± 1.8 | 10.4 ± 2.1 | 12.6 ± 1.1 | 4.5 ± 0.7 | 19.2 ± 1.2 | 25.8 ± 1.2 | |
| dY | | | | | | | | |
| GSF | 1984 | 57.0 ± 2.6 | 21.9 ± 2.3 | 7.3 ± 2.2 | 21.1 ± 2.2 | 5.1 ± 2.1 | 17.6 ± 2.1 | 9.3 ± 2.2 |
| | 1990 | 59.9 ± 2.8 | 21.3 ± 2.4 | 6.6 ± 2.3 | 21.2 ± 2.3 | 4.7 ± 2.2 | 17.5 ± 2.3 | 9.7 ± 2.3 |
| | 1993 | 62.2 ± 3.4 | 19.8 ± 2.7 | 7.9 ± 2.4 | 21.5 ± 2.4 | 5.0 ± 2.4 | 17.8 ± 2.4 | 10.4 ± 2.4 |
| USN | 1984 | 52.0 ± 2.6 | 11.5 ± 2.5 | 8.7 ± 2.3 | 20.4 ± 2.3 | 6.3 ± 2.3 | 16.8 ± 2.3 | 8.0 ± 2.3 |
| | 1990 | 50.3 ± 2.7 | 11.4 ± 2.5 | 8.1 ± 2.3 | 20.8 ± 2.4 | 5.5 ± 2.4 | 16.6 ± 2.3 | 8.4 ± 2.4 |
| | 1993 | 54.9 ± 3.3 | 8.5 ± 2.8 | 8.9 ± 2.5 | 20.9 ± 2.5 | 6.4 ± 2.5 | 16.6 ± 2.5 | 8.9 ± 2.5 |
| IVS | 1984 | 44.9 ± 2.7 | 22.1 ± 2.4 | 8.1 ± 2.1 | 24.6 ± 2.1 | 12.1 ± 2.1 | 17.5 ± 2.1 | 10.8 ± 2.1 |
| | 1990 | 44.7 ± 2.9 | 22.2 ± 2.6 | 8.2 ± 2.2 | 24.7 ± 2.3 | 12.1 ± 2.2 | 17.5 ± 2.2 | 10.9 ± 2.2 |
| | 1993 | 43.9 ± 3.0 | 22.9 ± 2.8 | 8.4 ± 2.3 | 24.7 ± 2.4 | 12.2 ± 2.3 | 17.6 ± 2.3 | 11.1 ± 2.3 |
| C04 | 1984 | 55.6 ± 2.4 | 22.2 ± 2.1 | 6.2 ± 1.8 | 11.2 ± 1.8 | 7.4 ± 1.8 | 19.4 ± 1.8 | 16.0 ± 1.8 |
| | 1990 | 53.8 ± 2.4 | 25.0 ± 2.1 | 5.1 ± 1.9 | 10.9 ± 1.8 | 8.3 ± 1.9 | 19.4 ± 1.8 | 15.6 ± 1.8 |
| | 1993 | 59.2 ± 3.2 | 20.1 ± 2.5 | 5.4 ± 1.9 | 11.3 ± 1.9 | 7.6 ± 1.9 | 19.2 ± 1.8 | 15.2 ± 1.9 |
| NEOS | 1984 | 63.9 ± 2.6 | 14.2 ± 2.4 | 14.3 ± 1.9 | 25.9 ± 1.9 | 16.7 ± 1.8 | 12.6 ± 1.8 | 9.5 ± 1.8 |
| | 1990 | 60.1 ± 2.1 | 25.9 ± 2.1 | 3.7 ± 1.5 | 23.4 ± 1.5 | 16.3 ± 1.4 | 13.7 ± 1.4 | 12.1 ± 1.4 |
| | 1993 | 69.5 ± 2.1 | 17.9 ± 2.0 | 5.7 ± 1.4 | 25.5 ± 1.4 | 17.7 ± 1.3 | 14.1 ± 1.3 | 13.5 ± 1.3 |
| Среднее | 56.2 ± 2.1 | 19.6 ± 1.5 | 7.2 ± 0.9 | 20.6 ± 1.5 | 11.0 ± 1.4 | 16.5 ± 0.8 | 11.9 ± 0.8 | |

Таблица 4. Поправки к амплитудам нутационных членов, определенные совместно с квадратичной моделью поправок прецессии, в мсек. дуги

| Ряд | T_1 | Период гармоника, сут | | | | | | |
|---------|-------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | 6798.38 | 3399.19 | 365.26 | 182.62 | 121.75 | 27.55 | 13.66 |
| dX | | | | | | | | |
| GSF | 1984 | 62.9 ± 3.1 | 15.9 ± 2.5 | 2.9 ± 2.1 | 11.9 ± 2.2 | 1.9 ± 2.2 | 21.7 ± 2.2 | 24.5 ± 2.1 |
| | 1990 | 55.0 ± 4.6 | 10.8 ± 2.8 | 2.1 ± 2.2 | 11.8 ± 2.3 | 1.9 ± 2.2 | 21.5 ± 2.2 | 24.3 ± 2.2 |
| | 1993 | 75.5 ± 10.2 | 13.3 ± 3.4 | 3.1 ± 2.3 | 12.2 ± 2.4 | 1.9 ± 2.4 | 21.4 ± 2.3 | 24.5 ± 2.3 |
| USN | 1984 | 48.4 ± 3.0 | 8.2 ± 2.4 | 6.0 ± 2.2 | 10.6 ± 2.2 | 1.9 ± 2.2 | 16.6 ± 2.2 | 27.1 ± 2.2 |
| | 1990 | 46.8 ± 4.7 | 6.8 ± 2.8 | 5.2 ± 2.3 | 11.3 ± 2.3 | 2.0 ± 2.3 | 16.5 ± 2.3 | 26.8 ± 2.3 |
| | 1993 | 66.7 ± 10.8 | 13.2 ± 3.6 | 6.2 ± 2.4 | 11.7 ± 2.5 | 2.3 ± 2.5 | 16.4 ± 2.4 | 26.4 ± 2.4 |
| IVS | 1984 | 66.4 ± 5.5 | 14.9 ± 2.8 | 2.1 ± 2.2 | 7.0 ± 2.2 | 6.5 ± 2.2 | 17.3 ± 2.1 | 18.5 ± 2.2 |
| | 1990 | 69.3 ± 7.4 | 15.9 ± 3.1 | 2.2 ± 2.3 | 7.1 ± 2.3 | 6.4 ± 2.3 | 17.3 ± 2.3 | 18.4 ± 2.3 |
| | 1993 | 102.2 ± 12.1 | 23.1 ± 3.7 | 2.4 ± 2.4 | 7.7 ± 2.4 | 6.2 ± 2.4 | 16.9 ± 2.4 | 18.6 ± 2.4 |
| C04 | 1984 | 52.8 ± 3.7 | 16.2 ± 2.6 | 7.9 ± 2.0 | 10.3 ± 2.1 | 6.3 ± 2.0 | 27.1 ± 2.0 | 24.5 ± 1.9 |
| | 1990 | 57.0 ± 5.6 | 17.1 ± 2.8 | 8.3 ± 2.2 | 11.5 ± 2.2 | 6.0 ± 2.1 | 27.2 ± 2.1 | 24.1 ± 2.1 |
| | 1993 | 66.5 ± 13.6 | 16.5 ± 3.1 | 8.7 ± 2.3 | 12.9 ± 2.3 | 6.6 ± 2.2 | 27.2 ± 2.2 | 24.2 ± 2.2 |
| NEOS | 1984 | 40.8 ± 2.4 | 19.7 ± 2.1 | 28.4 ± 1.9 | 16.6 ± 1.9 | 7.7 ± 1.9 | 15.1 ± 1.9 | 34.9 ± 1.9 |
| | 1990 | 38.8 ± 2.2 | 23.0 ± 1.4 | 16.2 ± 1.3 | 16.4 ± 1.3 | 3.8 ± 1.3 | 17.8 ± 1.3 | 28.1 ± 1.3 |
| | 1993 | 101.7 ± 4.9 | 22.6 ± 1.8 | 17.4 ± 1.3 | 15.3 ± 1.3 | 3.8 ± 1.2 | 16.5 ± 1.2 | 29.1 ± 1.2 |
| Среднее | | 51.7 ± 4.2 | 17.4 ± 1.5 | 10.3 ± 2.1 | 12.6 ± 1.0 | 4.4 ± 0.7 | 19.3 ± 1.2 | 25.9 ± 1.2 |
| dY | | | | | | | | |
| GSF | 1984 | 58.9 ± 3.6 | 21.0 ± 2.4 | 7.1 ± 2.2 | 21.0 ± 2.2 | 5.1 ± 2.1 | 17.6 ± 2.1 | 9.3 ± 2.2 |
| | 1990 | 60.0 ± 4.8 | 21.9 ± 2.7 | 6.7 ± 2.3 | 21.1 ± 2.3 | 4.7 ± 2.2 | 17.5 ± 2.3 | 9.7 ± 2.3 |
| | 1993 | 109.9 ± 10.8 | 26.7 ± 3.5 | 7.6 ± 2.4 | 20.0 ± 2.4 | 4.7 ± 2.4 | 18.1 ± 2.4 | 10.2 ± 2.4 |
| USN | 1984 | 51.6 ± 3.1 | 11.9 ± 2.5 | 9.0 ± 2.3 | 20.4 ± 2.3 | 6.3 ± 2.3 | 16.7 ± 2.3 | 8.0 ± 2.3 |
| | 1990 | 50.1 ± 4.9 | 11.4 ± 2.6 | 8.1 ± 2.3 | 20.8 ± 2.4 | 5.5 ± 2.4 | 16.6 ± 2.3 | 8.4 ± 2.4 |
| | 1993 | 114.3 ± 11.3 | 19.8 ± 3.7 | 8.6 ± 2.4 | 19.3 ± 2.5 | 5.7 ± 2.5 | 16.9 ± 2.5 | 8.7 ± 2.5 |
| IVS | 1984 | 59.1 ± 5.4 | 23.2 ± 2.7 | 8.4 ± 2.1 | 24.0 ± 2.1 | 12.2 ± 2.1 | 17.6 ± 2.1 | 11.0 ± 2.1 |
| | 1990 | 69.3 ± 7.6 | 24.1 ± 3.0 | 8.5 ± 2.2 | 23.7 ± 2.3 | 12.2 ± 2.2 | 17.6 ± 2.2 | 11.1 ± 2.2 |
| | 1993 | 103.8 ± 12.2 | 26.5 ± 3.2 | 8.8 ± 2.3 | 22.9 ± 2.4 | 12.2 ± 2.3 | 17.9 ± 2.3 | 11.4 ± 2.3 |
| C04 | 1984 | 58.6 ± 3.0 | 23.3 ± 2.2 | 6.4 ± 1.8 | 11.0 ± 1.8 | 7.4 ± 1.8 | 19.3 ± 1.8 | 16.2 ± 1.8 |
| | 1990 | 46.5 ± 4.6 | 22.6 ± 2.4 | 5.0 ± 1.9 | 11.0 ± 1.8 | 8.4 ± 1.9 | 19.5 ± 1.8 | 15.2 ± 1.8 |
| | 1993 | 75.2 ± 11.0 | 19.6 ± 2.6 | 5.5 ± 1.9 | 11.2 ± 1.9 | 7.5 ± 1.9 | 19.2 ± 1.8 | 15.4 ± 1.9 |
| NEOS | 1984 | 63.5 ± 2.6 | 17.6 ± 2.7 | 14.5 ± 1.9 | 26.0 ± 1.9 | 16.7 ± 1.8 | 12.7 ± 1.8 | 9.6 ± 1.8 |
| | 1990 | 53.4 ± 3.1 | 23.7 ± 2.1 | 4.6 ± 1.5 | 23.4 ± 1.5 | 16.1 ± 1.4 | 14.1 ± 1.4 | 12.3 ± 1.4 |
| | 1993 | 89.6 ± 5.7 | 20.1 ± 2.1 | 4.7 ± 1.4 | 25.3 ± 1.4 | 17.9 ± 1.3 | 14.2 ± 1.3 | 13.4 ± 1.3 |
| Среднее | | 59.9 ± 3.4 | 20.7 ± 1.3 | 7.2 ± 0.9 | 20.3 ± 1.5 | 10.9 ± 1.4 | 16.6 ± 0.8 | 11.9 ± 0.8 |

разделяются линейный и квадратичный члены, но в то же время для этой модели корреляция между смещением полюса p_0 и параметрами модели нутации меньше, чем для линейной модели. Вообще, можно заметить, что смена модели поправок к параметрам прецессии с линейной на квадратичную существенно меняет не только корреляции между этими параметрами, но и между параметрами нутации.

Поправки к прецессионным членам, полученные для пяти сравниваемых рядов СРО, приведены в табл. 2. Для каждого ряда даны результаты для трех начальных эпох T_1 . Для вычисления средних значений по всем рядам использовалась комбинированная оценка, предложенная в [19], которая позволяет учитывать как ошибки усредняемых значений, так и их разброс.

Результаты вычислений показывают, что для линейной модели оба параметра линейного тренда определяются достаточно уверенно. Для квадратичной модели уверенно определились только поправки к смещению полюса p_0 и менее уверенно поправки к скорости прецессии. В целом можно сказать, что ошибки определения параметров линейной модели определяются значительно более точно, чем параметры квадратичной модели, что не удивительно, принимая во внимание сравнительно короткий интервал наблюдений. Можно также отметить, что при применении линейной модели прецессии результаты, полученные по различным интервалам наблюдений, практически совпали, чего нельзя сказать в случае квадратичной модели.

Надо отметить полученные большие значения параметров сдвига, особенно по координате Y . Что касается координаты X , хотя средняя поправка получилась небольшой, это объясняется резко отличающимися от остальных результатами, полученными по ряду NEOS. Для всех других определяемых параметров результаты по этому ряду соответствуют остальным данным.

При применении квадратичной модели поправки к скорости прецессии p_1 и к квадратичному члену p_2 определились неуверенно. При этом, хотя формально средние поправки к p_1 являются статистически значимыми, большой разброс значений для разных данных не позволяет сделать обоснованные рекомендации по коррекции модели прецессии IAU 2000/2006 в отношении скорости прецессии.

В табл. 3 и 4 приводятся результаты вычислений поправок к амплитудам семи основных нутационных членов, определенных одновременно с линейной и квадратичной моделью прецессионных поправок, соответственно. Для поправок к амплитудам основных нутационных членов были получены существенные и статистически значимые поправки как для долгопериодических, так и для короткопериодических членов. При этом согласие

результатов, полученных по разным данным, в целом достаточно хорошее, за исключением члена нутации с периодом 18.6 года. Можно также отметить, что при использовании линейной модели поправок прецессионных параметров получается лучшая точность определения амплитуды долгопериодических членов нутации и меньший разброс их значений при использовании разных интервалов наблюдений. Очевидно, что длительность имеющегося интервала РСДБ-наблюдений пока недостаточна для уверенного разделения этого нутационного колебания с полиномиальными членами прецессии. Поправки к амплитудам нутационных членов с периодами год и меньше практически не зависят от используемой модели поправок к параметрам прецессии и, в большинстве случаев, от периода наблюдений.

Что касается случайных ошибок поправок к модели IAU 2000/2006, они также существенно зависят как от используемого ряда СРО, так и от интервала наблюдений, причем эта зависимость разная для разных параметров. Ошибка поправок к параметрам прецессии и долгопериодических членов нутации (6798.38 и 3399.19 сут) растет с укорочением интервала данных, т.е. со смещением начала интервала от 1984.0 до 1993.0. При этом нужно учесть, что возрастание ошибок параметров прецессии определяется не только уменьшением длительности интервала и числа данных, но также и увеличением сдвига стандартной эпохи теории 2000.0 относительно середины интервала (известно, что при определении параметров тренда методом наименьших квадратов ошибки получаемых оценок минимальны при совпадении начальной эпохи с серединой интервала). В то же время ошибки амплитуд членов нутации с периодами от года и меньше мало зависят от используемого интервала наблюдений, что может объясняться взаимной компенсацией уменьшения числа данных и увеличения их точности при исключении из обработки ранних наблюдений. Для ряда NEOS ошибки амплитуд всех членов нутации, кроме 18-летнего, вообще заметно уменьшаются при смещении начала интервала от 1984.0 до 1993.0. Наконец, при выборе оптимального интервала РСДБ-наблюдений следует обратить внимание на большие систематические ошибки данных, полученных в середине 1980-х гг., ясно видимых на рис. 1, особенно для dY .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Точность модели прецессии и нутации определяется точностью астрономических и геофизических моделей, применяемых для ее построения, а также точностью рядов СРО, используемых для уточнения ее параметров. Сравнение результатов определения поправок к основным параметрам

модели прецессии и нутации IAU 2006/2000 с использованием пяти индивидуальных и сводных рядов СРО показало, что они существенно зависят от использованных рядов СРО и интервала наблюдений. При этом полученные данные не дают убедительных аргументов в пользу использования индивидуальных или сводных рядов. С другой стороны, подобные сравнения дают важный материал для изучения систематических ошибок рядов СРО и, таким образом, могут помочь в повышении их точности.

В целом, из результатов представленной работы следует, что большинство ключевых параметров модели IAU 2000/2006, в первую очередь смещение полюса и амплитуды основных членов нутации, требуют существенных коррекций их официальных значений. Однако величина этих коррекций по разным рядам СРО существенно различается. Поэтому целесообразно определять окончательную величину поправок к модели прецессии и нутации не по одному ряду СРО, а из тщательного сопоставления и, возможно, усреднения результатов, полученных по различным данным и различным периодам наблюдений. Использование небольшого числа избранных рядов без их специального сравнительного анализа, как это практикуется до сих пор, может приводить к существенным систематическим ошибкам параметров теории вращения Земли.

Как следует из проделанных вычислений, результаты определения не только параметров прецессии, но и параметров долгопериодических членов нутации существенно зависят от принятой модели поправок к прецессионным параметрам. Полученные результаты показали, что применение квадратичной модели вызывает значительное понижение точности определения всех параметров. При этом существенно возрастает разброс результатов, полученных по разным рядам и интервалам наблюдений. Очевидно, что с точки зрения улучшения модели прецессии длительности имеющегося ряда РСДБ-наблюдений достаточно лишь для надежного улучшения только смещения небесного полюса и скорости прецессии, т.е. параметров линейной модели.

Автор выражает благодарность рецензенту за

полезные замечания, учет которых позволил улучшить статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Shirai and T. Fukushima, *Astron. J.* **121**, 3270 (2001).
2. В. Е. Жаров, С. Л. Пасынок, *Астрон. журн.* **78**, 1034 (2001).
3. P. M. Mathews, T. A. Herring, and B. A. Buffett, *J. Geophys. Res.* **107**, 2068 (2002).
4. T. A. Herring, P. M. Mathews, and B. A. Buffett, *J. Geophys. Res.* **107**, 2069 (2002).
5. N. Capitaine, P. T. Wallace, and J. Chapront, *Astron. and Astrophys.* **432**, 355 (2005).
6. G. Petit and B. Luzum, eds., *IERS Conventions (2010)*, IERS Technical Note No. 36 (Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010).
7. H. Schuh and D. Behrend, *J. Geodyn.* **61**, 68 (2012).
8. J. Vondrák and B. Richter, *J. Geodesy* **77**, 585 (2004).
9. Z. Malkin, in: *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2012 General Meeting Proceedings*, eds D. Behrend, K. D. Baver (NASA, 2012), p. 375.
10. C. Bizouard and D. Gambis, in: *Geodetic Reference Frames*, International Association of Geodesy Symposium, v. 134, ed. H. Drewes (Berlin—Heidelberg: Springer, 2009), p. 265.
11. W. Wooden, B. Luzum, and N. Stamatakos, *Highlights Astron.* **15**, 218 (2010).
12. S. Böckmann, T. Artz, A. Nothnagel, and V. Tesmer, *J. Geophys. Res.* **115**, B04404 (2010).
13. Z. M. Malkin, *Solar System Res.* **41**, 492 (2007).
14. Z. Malkin, in: *Proc. Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels*, Paris, France, 20–22 Sep. 2010, ed. N. Capitaine (Obsev. Paris, CRNS, 2011), p. 172.
15. Z. Malkin, *J. Geodyn.* **72**, 53 (2013a).
16. З. М. Малкин, *Астрон. журн.* **87**, 1141 (2010); e-Print arXiv:1012.1147 [physics.geo-ph] (2007).
17. Z. Malkin, in: *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry: General Meeting Proceedings*, eds N. R. Vandenberg, K. D. Baver (Hanover, MD: NASA STI, 2002), pp. 335.
18. N. Capitaine, P. M. Mathews, V. Dehant, P. T. Wallace, and S. B. Lambert, *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* **103**, 179 (2009).
19. З. М. Малкин, *Астрон. журн.* **90**, 959 (2013b).