

УДК 521.92

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА СРО ДВИЖЕНИЯ НЕБЕСНОГО ПОЛЮСА

© 2010 г. З. М. Малкин

Учреждение Российской академии наук Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 14.04.2010 г.; принята в печать 08.06.2010 г.

Отмечается, что наиболее точные значения углов прецессии-нутаии, определяющих положение небесного полюса, получаются из РСДБ-наблюдений на глобальных сетях станций, результаты которых бывают доступны, как правило, через 2–4 недели после наблюдений. Поэтому для многих приложений, таких как спутниковые навигационные системы, оперативные определения всемирного времени и космическая навигация, на практике используются прогнозные значения координат небесного полюса. В связи с этим впервые исследуется точность прогнозов углов прецессии-нутаии на материале реальных данных, полученных за последние 3 года, с тремя эмпирическими моделями нутаии, разработанными в Морской обсерватории США, Парижской обсерватории и Пулковской обсерватории. Результаты сравнения показали, что последняя модель имеет значительное преимущество в точности предсказания координат небесного полюса. Среднеквадратичная ошибка прогноза на один месяц по этой модели составляет менее 100 мсек. дуги.

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогноз параметров вращения Земли (ПВЗ) — координат земного полюса, всемирного времени и координат небесного полюса (НП) — представляет собой экстраполяцию полученных из наблюдений значений этих параметров на некоторый промежуток времени (длину прогноза) после последней даты наблюдений. Такой прогноз нужен для многих научных и практических приложений, поэтому развитию соответствующих методов и исследованию точности прогноза посвящено множество работ (см., например, [1–6] и цитируемую там литературу). При этом легко заметить, что практически все известные исследования в этой области посвящены прогнозу координат земного полюса и всемирного времени.

Объясняется это тем, что, в отличие от них, для движения НП возможно разработать модель прецессии-нутаии, точность которой будет достаточной для многих практических целей. В такой ситуации фактически повышение точности теории прецессии-нутаии обеспечивает одновременно и повышение точности прогноза. Так последняя теория, рекомендованная в качестве международного стандарта Международным астрономическим союзом (МАС) и состоящая из теории нутаии IAU2000A (резолюция МАС В1.6 2000 г.) и теории прецессии P03 (резолюция МАС В1 2006 г.), имеет заявленную точность 100 мсек. дуги. Однако это значение не отражает реальной ошибки

положения НП, вычисляемого по теории МАС, поскольку последняя описывает только часть полного движения оси вращения Земли, которое, кроме членов, входящих в теорию, включает также ряд немоделируемых на современном уровне знаний, и, следовательно, непредсказуемых эффектов, суммарный вклад которых достигает в наше время 400 мсек. дуги. Основными из этих эффектов являются свободная нутаия ядра (FCN — Free Core Nutation) и тренд.

Таким образом, для тех приложений, где достаточна точность учета прецессии-нутаии около 500 мсек. дуги, специальные процедуры прогноза не нужны. Для приложений, более требовательных к точности моделирования движения НП в реальном времени и тем более с упреждением по времени, необходимо моделировать и прогнозировать отличие реального движения НП от теории МАС, называемое смещением НП (в международной терминологии СРО — Celestial Pole Offset) (именно значения СРО dX и dY обеспечиваются центрами обработки РСДБ-наблюдений и службами определения ПВЗ). С этой целью были разработаны несколько эмпирических моделей, которые постоянно поддерживаются в актуальном состоянии и могут быть использованы на практике [7].

Для каждой модели авторы публикуют с регулярным обновлением ряд СРО на заданные моменты времени с прогнозом. Однако, только небольшое число работ посвящено исследованию ошибок

прогноза СРО [8–10], причем их изучение проводилось на исторических данных о движении НП, что может приводить к существенному искажению оценок точности прогноза, особенно краткосрочного [11]. Кроме того, только в [10] исследуется модель, открыто доступная для практического применения. Поэтому пользователи имеющихся прогнозов движения НП лишены возможности получить статистически обоснованную оценку погрешностей получаемых результатов. Единственная известная нам попытка оценки реальной ошибки прогноза СРО была сделана в рамках специальной тестовой кампании Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (IERS) [12]. К сожалению, в этом проекте анализировались прогнозы только двух центров, не находящихся в открытом доступе и выполненные с использованием неизвестной модели. Из приведенных в [12] графических данных можно сделать вывод о точности прогноза СРО на уровне около 150 мксек. дуги на срок до одного года.

В настоящей работе впервые детально анализируются результаты реальных прогнозов СРО, сделанных в различных центрах вычисления и анализа ПВЗ в 2007–2009 гг. с использованием различных моделей, сохраненные в нашей базе данных. Эти прогнозы сравнивались с окончательными значениями СРО, вычисляемыми Международной РСДБ-службой для геодезии и астрометрии (IVS – International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) по результатам РСДБ-наблюдений на глобальных сетях станций [13, 14]. Статистическая обработка этих данных позволила получить надежные оценки качества используемых в настоящее время методов прогноза движения НП. В качестве таких оценок использованы среднеквадратичная ошибка, максимальная ошибка и эффективность прогноза. Две первые величины являются характеристикой абсолютной ошибки прогноза, а последняя является мерой его относительной ошибки.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРО ИЗ РСДБ-НАБЛЮДЕНИЙ

Как известно, наиболее точные данные о движении НП обеспечиваются методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) на глобальных сетях станций. Такие наблюдения требуют участия многих обсерваторий разных стран и координируются IVS [13]. Вообще говоря, высокоточные данные о ПВЗ могут быть получены с любой сети РСДБ-станций, обладающей достаточными геометрическими параметрами, в первую очередь размером [15]. Однако в силу большой трудоемкости получения результата, что будет детально рассмотрено ниже, результаты РСДБ-наблюдений

бывают доступны с задержкой до нескольких месяцев, что недопустимо для практических пользователей ПВЗ, поскольку РСДБ является основным современным методом определения положения НП и всемирного времени. Поэтому для повышения оперативности определения ПВЗ IVS организовала наблюдения по двум специальным программам R1 (проводимые, как правило, с 17^h UTC понедельника до 17^h UTC вторника) и R4 (проводимые, как правило, с 18^h30^m UTC четверга до 18^h30^m UTC пятницы). Наблюдения по этим программам имеют приоритет на всех этапах обработки, что позволяет максимально уменьшить задержку результатов определения ПВЗ. Кроме того, расписание наблюдений по этим программам оптимизируется для получения наилучшей точности ПВЗ.

Как известно, сам принцип РСДБ заключается в независимой регистрации сигналов от радиисточника на станциях (радиотелескопах) РСДБ-сети. Затем все зарегистрированные данные доставляются на коррелятор для совместной обработки. Результаты корреляции содержат задержки и частоты интерференции, оформленные в виде файлов стандартного формата IVS Mark-3 DBN (в международной терминологии database v. 1) для S- и X-диапазонов. После этого данные подвергаются первичной обработке, во время которой они калибруются за влияние ионосферы, дополняются данными о кабельной задержке, метеопараметрах и некоторыми другими данными, измеренными на станциях, а также вычисляемыми теоретически. В результате создаются окончательные файлы наблюдений (в международной терминологии database v. 3 или 4), которые используются центрами анализа IVS для вычисления ПВЗ. После обработки наблюдений в отдельных центрах производится вычисление сводного ряда ПВЗ IVS. Все эти этапы вносят вклад в задержку времени доступности значений СРО для потребителей. Здесь под задержкой мы понимаем разность даты появления результатов вычисления ПВЗ и эпохой, к которой относятся эти ПВЗ.

Рассмотрим примерную раскладку этой задержки по этапам обработки оперативных определений ПВЗ по программам IVS R1 и R4:

1. Доставка наблюдений на коррелятор. Основная масса РСДБ-наблюдений на глобальных сетях станций в настоящее время регистрируется на магнитных дисках и доставляется на коррелятор экспресс-почтой, что обычно занимает от 3 до 7 дней. Это приводит к типичной задержке начала корреляции 6–8 дней.

2. Корреляция данных. Обычно корреляция занимает от 2 до 5 дней. В это время также входит предварительный анализ и калибровка данных, а

также формирование окончательного файла наблюдений и его размещение в центрах данных IVS для использования всеми центрами обработки.

3. Вычисление ПВЗ в центрах обработки IVS. Как правило, первые результаты получаются практически без задержки в том центре, где формируется окончательный файл наблюдений. В остальных центрах оперативной обработки результаты определения ПВЗ обычно получаются в течение 1–2 рабочих дней¹.

4. Вычисление сводного ряда ПВЗ IVS. Эта процедура обычно занимает от 2 до 10 дней.

В результате по данным нашего мониторинга минимальная отмеченная задержка сводных данных IVS в 2009 г. составила 12 дней, максимальная — 37 дней при медианном значении 19 дней. Таким образом, для конечного пользователя значения СРО обычно доступны через 1.5–2 недели после наблюдений при использовании результатов отдельных центров обработки и через 2–4 недели для пользователей, предпочитающих использовать сводный ряд IVS.

Задержка результатов наблюдений по другим программам IVS составляет от нескольких недель до нескольких месяцев, но эти результаты сравнительно мало влияют на окончательный ряд СРО. Следовательно, для большинства практических нужд достаточно иметь прогноз СРО на срок до 5 недель. Для других возможных приложений и в исследовательских целях интересно определить точность прогноза СРО и на более длительный период времени.

3. МОДЕЛИ СРО

Для анализа точности прогноза движения НП мы использовали модели, открыто доступные для использования в исследовательских и практических целях. Прежде чем приступить к их рассмотрению, заметим, что они разделяются на два типа: модели FCN и модели СРО, которые соотносятся между собой следующим образом:

$$\text{СРО} = \text{FCN} + \sum T_i + \sum P_j, \quad (1)$$

где $\sum T_i$ — сумма трендов, например, от ошибок модели прецессии, а $\sum P_j$ — сумма (квази)гармонических членов — например, от ошибок модели нутации или геофизических процессов. FCN является квазигармоническим процессом с переменной амплитудой и фазой [7], с максимальной амплитудой около 350 мксек. дуги. Вклад второго члена доходит в наши дни до 200 мксек. дуги и продолжает увеличиваться, вклад третьего

члена, по-видимому, меньше 100 мксек. дуги. Как указывалось выше, сумма значений координат НП, определяемых теорией прецессии-нутации МАС, и СРО обеспечивают наиболее точные данные о движении НП. Учет FCN вместо СРО приводит к заметным ошибкам вычисления положения НП, возрастающим со временем.

В настоящее время пользователю, нуждающемуся в наиболее точных координатах НП и их прогнозе, предоставляется три опции учета СРО:

Ряд СРО NEOS. Этот ряд, вычисляемый в Морской обсерватории США в рамках национальной службы определения ПВЗ США, является официальным оперативным комбинированным решением ПВЗ IERS и содержит, среди прочих ПВЗ, ряд СРО с 90-дневным прогнозом. В основе используемого алгоритма лежит вычисление сводного ряда координат НП по нескольким избранным РСДБ-рядам ПВЗ и его сравнение с моделью прецессии-нутации [16, с. 73]. Ряд СРО формально обновляется ежедневно, но фактически новые данные доступны с каждой новой обработанной РСДБ-сессией, в среднем 2–3 раза в неделю.

Модель FCN Ламбера (S. Lambert) SL. Эта модель вычисляется в Парижской обсерватории и рекомендована к использованию IERS Conventions (2003) — собранием наиболее современных астрономических и геофизических моделей, используемых при обработке астрометрических наблюдений [17, гл. 5]. Основой для вычислений FCN служит сводный ряд ПВЗ IERS, вычисляемый в Парижской обсерватории, и анализ его разностей с моделью прецессии-нутации. Параметры FCN вычисляются методом наименьших квадратов по двухлетним сдвигающимся интервалам, при этом среднее значение СРО по каждому интервалу исключается [10]. Таким образом публикуемый ряд, в отличие от других рядов, не содержит трендовых составляющих. Параметры FCN, получаемые на последнем интервале, используются для прогноза на один год. С 2009 г. ряд SL обновляется 1 раз в год 1 июля (Ламберт, частное сообщение).

Ряд СРО автора данной статьи ZM2. Этот ряд СРО вычисляется с 2007 г. в Пулковской обсерватории на основе ряда СРО IVS [7] и включает прогноз на 2 года. Метод построения этого ряда описан ниже. С 2008 г. этот ряд обновляется формально ежедневно (до этого примерно раз в месяц), но фактически новые данные доступны только после очередного обновления ряда IVS.

Основные данные о перечисленных моделях приведены в таблице.

Модель ZM2 является самой простой по своему построению и вычисляется путем гауссовского

¹ http://vlbi.geod.uni-bonn.de/IVS-AC/data/timeliness_2.html.

Основные характеристики моделей СРО

Модель	Тип	Прогноз	Сглаживание	URL
USNO	СРО	3 мес	слабое	http://www.usno.navy.mil/USNO/earth-orientation
SL	FCN	1 год	сильное	http://syrtte.obspm.fr/~lambert/fcn
ZM2	СРО	2 года	среднее	http://www.gao.spb.ru/english/as/persac

сглаживания (гауссовской высокочастотной фильтрации) ряда IVS отдельно для dX и dY :

$$x^*(t) = \frac{\sum_1^n p_i q_i x_i}{\sum_1^n p_i q_i}, \quad (2)$$

$$q_i = \exp[-(t - t_i)^2 / 2a^2],$$

где x_i — исходная серия данных, состоящая из n точек, заданных на моменты времени t_i , с весами p_i , $x^*(t)$ — сглаженное значение на момент времени t , a — параметр сглаживания. С увеличением a степень сглаживания увеличивается, т.е. результирующий ряд становится более гладким. Поскольку момент t может быть произвольным, этот метод может использоваться также для интерполяции, что будет использовано ниже. Это свойство гауссовского сглаживания, а также его нечувствительность к совпадающим или очень близким значениям t_i , выгодно отличает его для многих приложений от часто используемого в астрометрии сглаживания методами Уиттекера и Вондрака (см. [18]). Прогноз ряда ZM2 осуществляется методом авторегрессии.

На рис. 1 показано сравнение трех моделей с рядом СРО IVS, а на рис. 2 приведены разности между ними. Эти данные показывают, что модели NEOS и ZM2 систематически довольно близки между собой, поскольку построены по сходному принципу, хотя данные ZM2 существенно более гладкие, что кажется более соответствующим природе явления. Можно предположить, что модель NEOS в большей степени искажена шумом наблюдательных данных. Некоторые наблюдаемые систематические сдвиги между ними, скорее всего, объясняются различием РСДБ-данных, используемых при их построении, как указывалось выше. Также можно заметить, что прогнозы, полученные по этим двум моделям (см. данные рис. 1 после последней точки IVS), сильно отличаются между собой.

Модель SL является моделью FCN, а не СРО и включает по определению только сигнал с периодом 430.2 сут [10]. Поэтому на рис. 1 она центрирована относительно оси ординат, показывая заметный сдвиг относительно наблюдений (данных IVS). Кроме того она, по-видимому, является слишком гладкой, из-за чего не отражает все особенности вращения Земли.

4. ОШИБКА ПРОГНОЗА СРО

Для оценки точности прогнозирования СРО были использованы прогнозы, сделанные в Морской обсерватории США (модель NEOS), Парижской обсерватории (модель SL) и Пулковской обсерватории (модель ZM2) в 2007–2009 гг., т.е. за последние 3 года. Для моделей NEOS и ZM2, обновляющихся ежедневно, использовались выборки данных с интервалом в неделю. Таким образом, в работе были использованы 153 прогноза NEOS, 121 прогноз ZM2 и 18 прогнозов SL.

Любое изучение ошибок прогноза некоторого явления основано на апостериорном анализе разностей прогнозов с окончательными (полученными из наблюдений) значениями. В нашем случае не вполне ясно, что принимать за окончательные данные, которыми могут служить как ряды СРО, полученные в отдельных центрах обработки, так и сводные ряды ПВЗ IVS и IERS. Мы считаем на данном этапе наиболее подходящим для роли эталона для сравнения сводный ряд ПВЗ IVS, который сохраняет преимущество использования всех доступных РСДБ-данных и который в то же время не подвержен возможному методическим ошибкам составления сводных рядов IERS.

Другой трудностью в сравнении прогнозов с окончательными данными является значительная зашумленность последних. Это относится как к индивидуальным, так и к сводным рядам СРО, что хорошо видно на рис. 1. Так для ряда IVS величина шумовой составляющей в амплитуде СРО $\sqrt{dX^2 + dY^2}$, оцененной как взвешенная вариация Аллана (см. [19]), составляет 118 мсек. дуги для всего ряда 1984.0–2009.9 и 91 мсек. дуги для последних 3 лет, т.е. для данных, используемых в настоящей работе.

Поскольку данные IVS приводятся на средние моменты суточных сессий наблюдений, а все прогнозы приводятся на начало гринвичских суток, необходимо привести ряд IVS к стандартному равноотстоящему разумно гладкому виду с шагом в одни сутки, что может быть достигнуто интерполяцией с одновременным сглаживанием — например, с использованием гауссовского фильтра или сглаживающего сплайна. Мы воспользовались первым подходом, применяя формулу (2). При этом

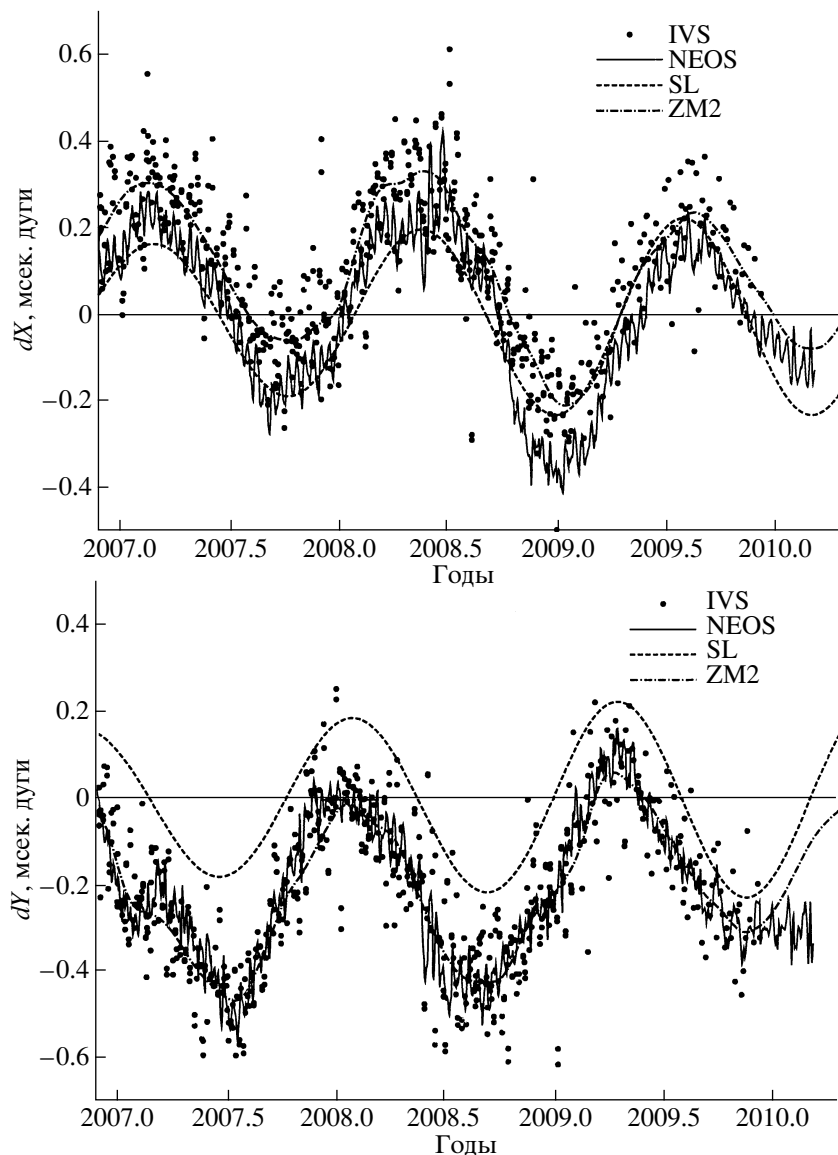


Рис. 1. Сравнение значений СРО по данным моделей NEOS, SL, ZM2 с данными IVS.

возникает вопрос о выборе оптимальной величины параметра (степени) сглаживания a .

Проблема заключается в том, что модели ZM2 и NEOS построены фактически именно таким образом, хотя и с использованием разных, но близких, входных данных и разной степени сглаживания. Поэтому, варьируя степень сглаживания при построении опорного ряда для сравнения на основе сглаживания-интерполяции ряда IVS, можно искусственно сблизить этот опорный ряд с одним из сравниваемых, что, конечно, исказит оценки точности прогноза СРО разными методами.

Чтобы сделать наше сравнение максимально объективным, мы провели расчеты точности прогноза с шестью разными параметрами сглаживания $a = 1, 2, 4, 8, 16, 32$. Результаты вычислений

оказались близки между собой. Для иллюстрации на рис. 3 приведены данные для двух параметров сглаживания: $a = 2$, близкого к ряду NEOS, и $a = 16$, близкого к модели ZM2. В левой части рисунка приведены исходный и сглаженный ряд IVS, в правой — среднеквадратичные ошибки прогноза. Эти ошибки названы внешними, поскольку вычислены относительно “внешнего” эталонного ряда СРО. Можно видеть, что результаты, полученные с разной степенью сглаживания ряда IVS перед его сравнением с прогнозами, приводят только к разной степени гладкости результирующих кривых, не меняя значительно соотношение точностей прогноза разными методами. Для полноты сравнения на рис. 4 приведены также максимальные ошибки прогноза для $a = 16$.

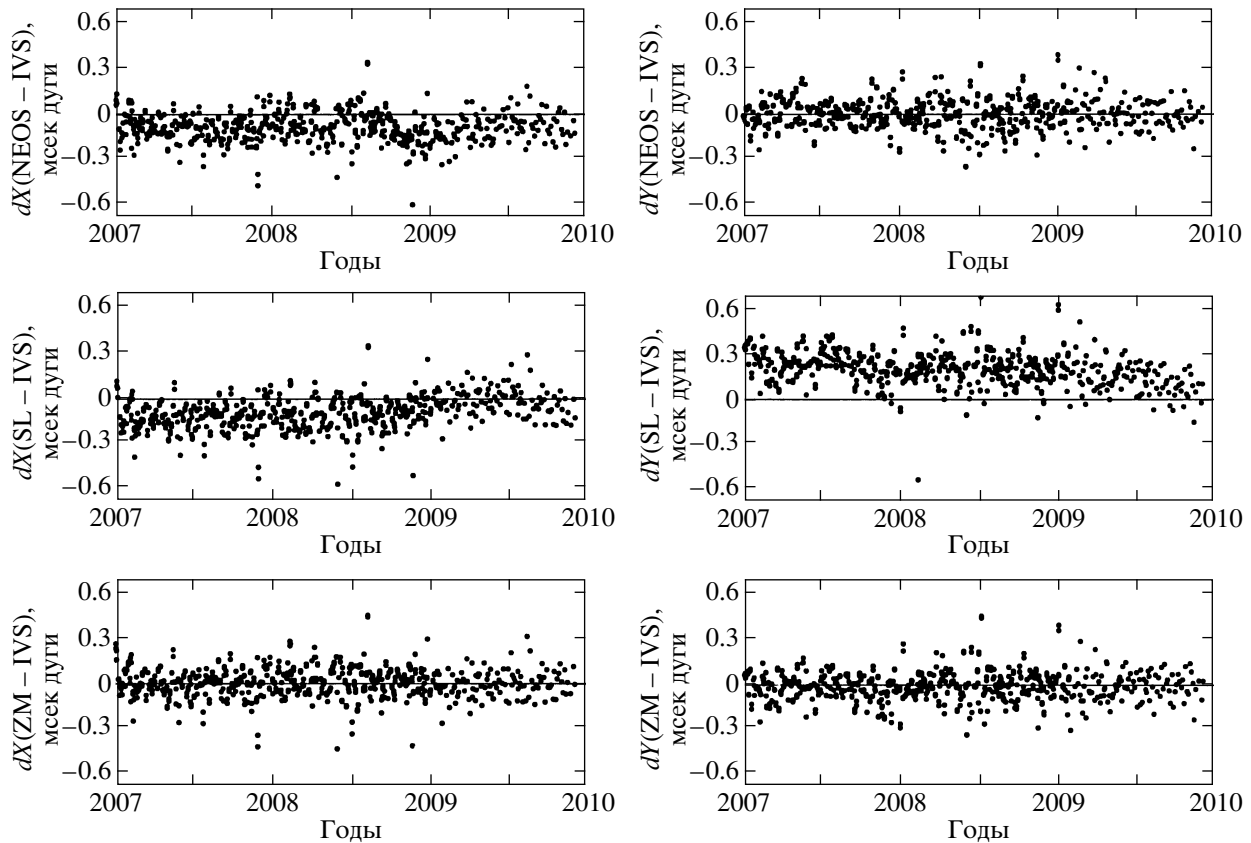


Рис. 2. Разности между моделями CPO и данными IVS (слева — dX , справа — dY , сверху вниз — модели NEOS, SL, ZM2).

Приведенные результаты позволяют сделать вполне определенные заключения о точности прогноза CPO разными методами:

- модель ZM2 показала наивысшую точность прогноза;
- модель NEOS имеет довольно высокую точность краткосрочного прогноза, быстро ухудшающуюся с его длиной;
- ошибка прогноза CPO по модели SL определяется в значительной степени систематическим сдвигом между ней и данными IVS, как уже отмечалось выше.

Справедливости ради, следует отметить, что модель SL, в отличие от двух других, является по своему построению моделью FCN, а не CPO, хотя она и рекомендована IERS Conventions для использования в качестве последней (из-за чего она собственно и включена в данное сравнение). По этой причине модель SL оказалась в заведомо проигрышном положении при сравнении с моделями NEOS и ZM2. Поэтому интересно также

изучить точность прогнозирования разными методами самой используемой модели. Для этого были повторен проведенный анализ с той разницей, что прогнозы сравнивались не с окончательным рядом IVS, а с окончательным рядом, полученным по той же модели. Результаты вычислений среднеквадратичных ошибок прогноза для этого случая приведены на рис. 5. Условно такие ошибки названы внутренними.

В качестве численной меры эффективности методов прогноза в [1] предложено использовать индекс P (predictability), который определяется как

$$P(\tau) = 1 - \frac{\sigma_p(\tau)}{\sigma_s}, \quad (3)$$

где τ — длина прогноза, $\sigma_p(\tau)^2$ — дисперсия ошибок прогноза для данного τ , σ_s^2 — дисперсия прогнозируемого сигнала. Значение $P = 1$ указывает на совпадение прогноза с окончательными значениями, что характерно для детерминированного процесса, полностью описываемого моделью, используемой для прогноза. Значение $P \leq 0$ указывает на полную несостоятельность метода прогноза. В нашем случае прогнозируемым сигналом является ряд CPO. Дисперсия ряда CPO, вообще говоря,

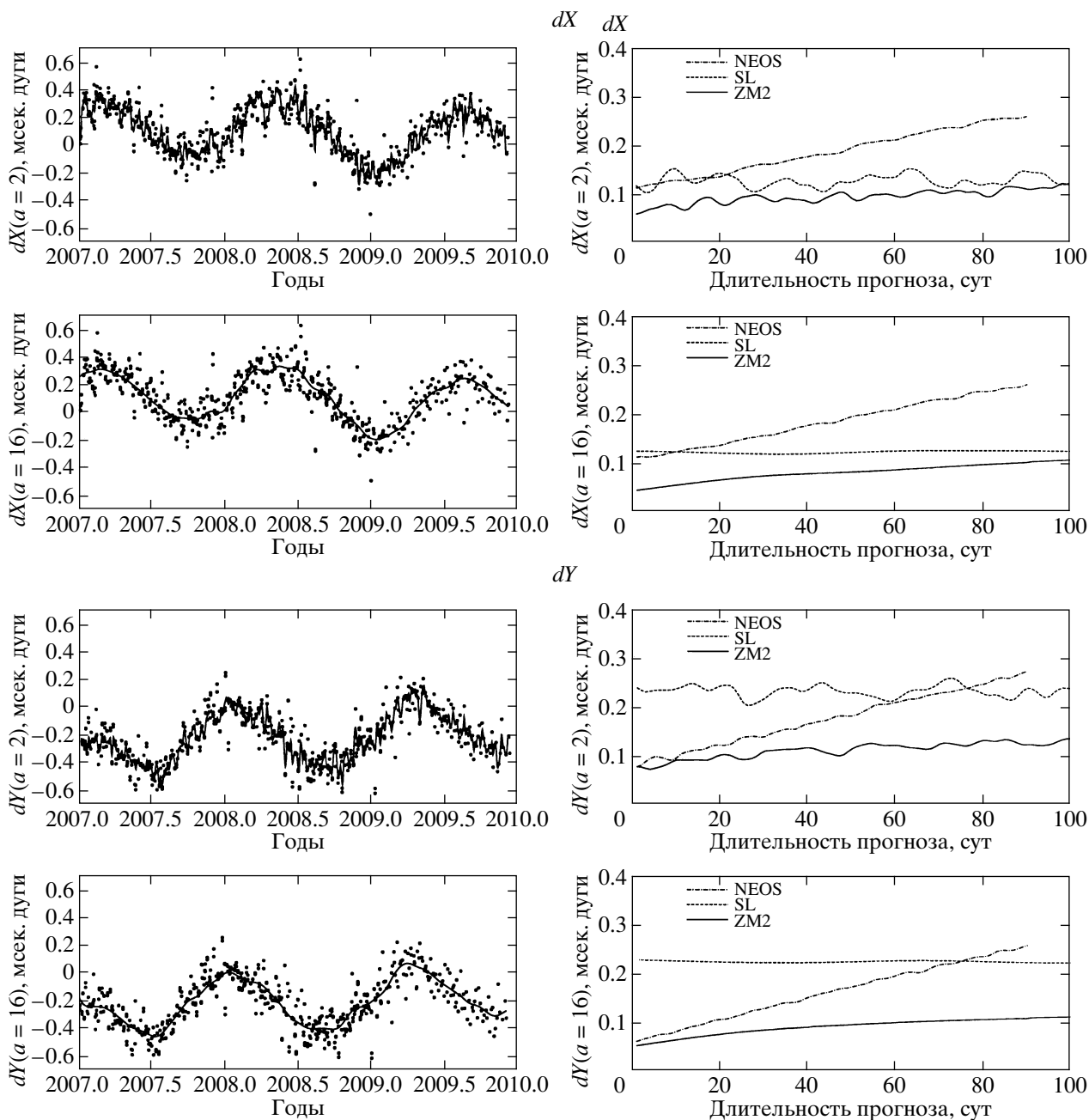


Рис. 3. Внешние ошибки прогноза для разных моделей СРО и двух параметров сглаживания данных IVS. Слева — исходный и сглаженный ряд IVS, справа — среднеквадратичные ошибки прогноза.

зависит, но не очень сильно, от рассматриваемого интервала времени. Для всего периода ряда IVS с 1984 по 2009 г. $\sigma_s = 0.18$ мсек. дуги для dX и $\sigma_s = 0.23$ мсек. дуги для dY . Для последних 3 лет $\sigma_s = 0.20$ мсек. дуги для dX и $\sigma_s = 0.27$ мсек. дуги для dY . Увеличение σ_s в последние годы не должно удивлять, поскольку это значение вычислено по исходному ряду, который включает тренд, величина которого растет со временем. В качестве $\sigma_p(\tau)$ используются среднеквадратичные ошибки прогноза

(рис. 3). Результаты вычисления эффективности прогноза приведены на рис. 6.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ точности прогноза СРО тремя методами, результаты которых доступны в настоящее время для практического использования: модель NEOS, вычисляемая в Морской обсерватории США и являющаяся частью оперативного сводного ряда ПВЗ IERS, модель SL,

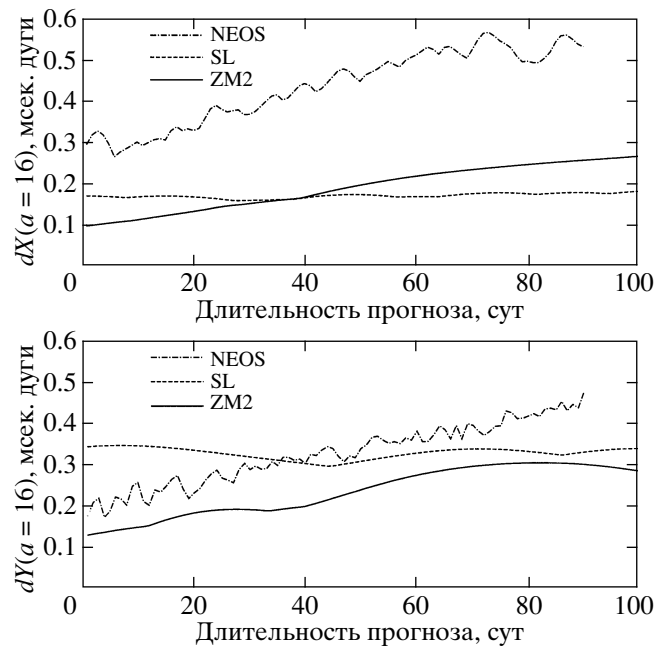


Рис. 4. Максимальные прогноза для разных моделей СРО.

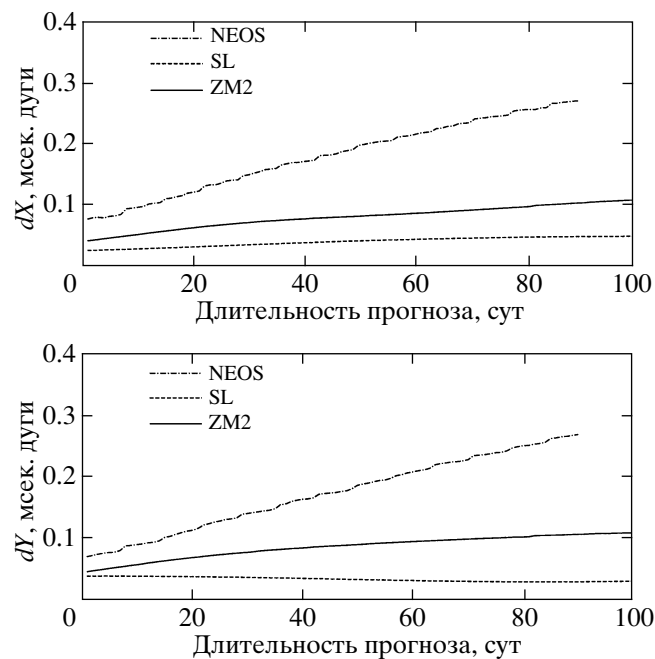


Рис. 5. Внутренние ошибки прогноза для разных моделей СРО.

вычисляемая в Парижской обсерватории и рекомендованная IERS Conventions (2003) для высокоточного учета движения НП, и модель ZM2, вычисляемая в Пулковской обсерватории. Основой для исследования послужили прогнозы СРО, сделанные в 2007–2009 гг., и их апостериорное сравнение с окончательным рядом СРО IVS. В результате статистического анализа полученных раз-

ностей были определены четыре характеристики точности прогноза каждым методом:

- среднеквадратичная ошибка прогноза СРО,
- максимальная ошибка прогноза СРО,
- эффективность прогноза СРО,

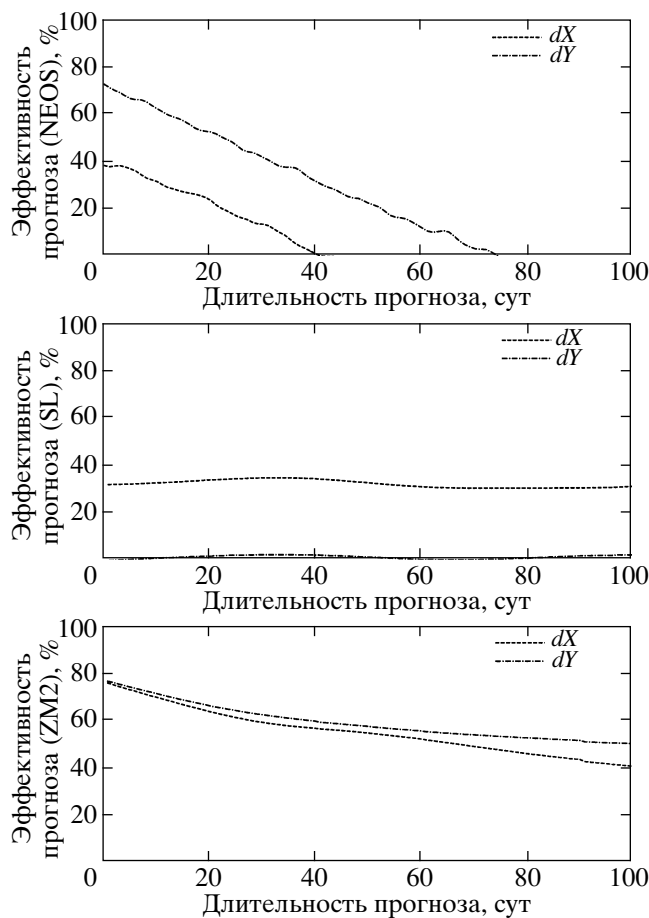


Рис. 6. Эффективность трех моделей прогноза СРО.

- среднеквадратичная ошибка прогноза заданной модели.

Первые три величины отражают реальную точность прогнозирования СРО, последняя интересна как показатель точности воспроизведения заданной моделью самой себя. В результате было получено, что модель ZM2 показала наилучшую точность прогноза СРО. Кроме того, только эта модель оказалась эффективной для прогноза обоих компонент движения НП dX и dY на всей длине прогноза до 100 дней. Среднеквадратичная ошибка прогноза на один месяц по этой модели составляет около 75–100 мсек. дуги в зависимости от степени сглаживания результата. Учитывая, что сама величина СРО, т.е. неучитываемая теорией часть движения НП, достигает в наши дни 400 мсек. дуги и продолжает увеличиваться со временем, применение предложенного метода прогноза позволяет по крайней мере впятеро увеличить точность учета СРО в эфемеридных вычислениях.

Надо заметить что только две сравниваемые модели NEOS и ZM предназначены для полного

описания движения НП, т.е. СРО. Модель SL является моделью FCN, т.е. только одной из составляющих СРО (см. формулу (1)), и не может конкурировать с двумя другими в смысле моделирования полного движения НП, хотя для моделирования и прогноза собственно FCN она показала себя весьма эффективной.

Основные выводы работы о сравнительной точности прогноза движения НП разными методами, полученные на основе сравнения среднеквадратичных ошибок прогноза, подтверждаются также анализом эффективности прогнозов (рис. 6).

Важно отметить, что настоящее исследование проведено на материале прогнозов, которые выполняются регулярно и открыто доступны в Интернете. Поэтому полученные результаты могут быть полезны не только для сравнительного изучения различных методов прогнозирования движения НП, но и для оценки точности имеющихся в распоряжении пользователя данных и выбора наиболее подходящих из них для конкретной решаемой задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Ф. Чао, *Bull. Geod.* **59**, 81 (1985).
2. Л. В. Рыхлова, Г. С. Курбасова, Т. А. Тайдакова, *Астрон. журн.* **67**, 151 (1990).
3. Л. Д. Акуленко, С. А. Кумакшев, Ю. Г. Марков, Л. В. Рыхлова, *Астрон. журн.* **79**, 952 (2002).
4. В. Л. Горшков, *Изв. Главн. астрон. обсерв. в Пулковке* **217**, 388 (2004).
5. W. Kosek, D. D. McCarthy, T. J. Johnson, and M. Kalarus, in: *Proceedings of the "Journées 2003 Systèmes de Référence Spatio-temporels"*, St.-Petersburg, Russia, 22–25 September 2003, eds A. Finkelstein, N. Capitaine (St. Petersburg, Inst. Appl. Astron. Russ. Acad. Sci., 2004), p. 164.
6. Л. Д. Акуленко, С. А. Кумакшев, Ю. Г. Марков, Л. В. Рыхлова, *Астрон. журн.* **83**, 376 (2006).
7. З. М. Малкин, *Астрон. вестн.* **41**, 531 (2007).
8. A. Brzeziński and W. Kosek, in: *Proceedings of the "Journées 2003 Systèmes de Référence Spatio-temporels"*, St. Petersburg, Russia, 22–25 September 2003, eds A. Finkelstein, N. Capitaine (St. Petersburg, Inst. Appl. Astron. Russ. Acad. Sci., 2004), p. 99.
9. M. Kalarus, B. J. Luzum, S. Lambert, and W. Kosek, in: *Proceedings of the "Journées 2005 Systèmes de Référence Spatio-temporels"*, Warsaw, Poland, 19–21 September 2005, eds A. Brzeziński, N. Capitaine, B. Kołaczek (Warsaw, Poland: Printing Division of the Space Research Centre PAS, 2006), p. 181.
10. S. Lambert, *Empirical Model of the Free Core Nutation (Technical Note)*, <http://syrtte.obspm.fr/lambert/icn/notice.pdf> (2009).
11. Z. Malkin, in: *Polar Motion: Historical and Scientific Problems*, Proc. IAU Coll. No. 178, Cagliari, Italy, September 27–30, 1999, ed. S. Dick, D. McCarthy, B. Luzum, ASP Conf. Ser. **208**, 505 (2000).
12. M. Kalarus, W. Kosek, and H. Schuh, in: *Proceedings of the "Journées 2007 Systèmes de Référence Spatio-temporels"*, Meudon, France, 17–19 September 2007, ed. N. Capitaine (Paris: Paris Observatory, 2008), p. 159.
13. W. Schlüter and D. Behrend, *J. Geodesy* **81**, 379 (2007).
14. S. Böckmann, T. Artz, A. Nothnagel, and V. Tesmer, *J. Geophys. Res.* **115**, B04404 (2010).
15. Z. Malkin, *J. Geodesy* **83**, 547 (2009).
16. *IERS Annual Report 2007* (Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2009).
17. D. D. McCarthy and G. Petit (eds), *IERS Conventions (2003)*, IERS Techn. Note No. 32 (Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004); last revision: <http://tai.bipm.org/iers/convupdt/listupdt.html>.
18. З. М. Малкин, *Кинем. и физ. небесн. тел* **12**, 92 (1996).
19. Z. Malkin, *J. Geodesy* **82**, 325 (2008).