

АСТРОНОМИЯ

УДК 521.93

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ
ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ МЕТОДОМ СНИИМ***З. М. Малкин¹, В. М. Тиссен²*

1. С.-Петербургский государственный университет,
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург
д-р физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., malkin@gao.spb.ru

2. Сибирская государственная геодезическая академия,
Сибирский государственный НИИ метрологии, Новосибирск
канд. техн. наук, доцент, tissen@mail.ksn.ru

1. Введение. Прогнозирование параметров вращения Земли (ПВЗ) играет очень важную роль во многих научных и практических приложениях. При этом во многих случаях, например, для спутниковых навигационных систем, требования к точности прогнозов постоянно возрастают [1]. Поэтому во многих организациях разных стран ведется работа по совершенствованию старых и разработке новых методов прогноза ПВЗ. Изучаются также возможности комбинации разных типов прогнозов в единый сводный прогноз аналогично тому, как это делается для рядов ПВЗ [2–4].

Один из новых методов прогнозирования ПВЗ, предложенных за последние несколько лет, развивается Сибирским государственным научно-исследовательским институтом метрологии (СНИИМ), г. Новосибирск [5]. Основным отличием этого метода от других, применяющихся в настоящее время в различных службах определения ПВЗ, является использование долговременных рядов ПВЗ длительностью до 100 лет для более точного определения трендов, которые моделируются полигармонической функцией. Такой подход направлен на повышение точности, в первую очередь, долгосрочного прогноза, хотя уточнение параметров тренда имеет важное значение также и для краткосрочного прогноза. Кроме того, повышение точности краткосрочного прогноза достигается за счет применения модифицированного авторами метода авторегрессии. Описание метода прогнозирования рядов ПВЗ, использующегося в СНИИМ, приводится в разделе 2.

Исследование точности прогнозов ПВЗ, полученных методом СНИИМ, проводилось в предыдущих работах авторов [6–9] только для всемирного времени и по от-

дельным сравнительно коротким периодам времени. В настоящей работе мы впервые обработали все прогнозы всемирного времени UT1–UTC (в дальнейшем, для краткости, просто UT1), полученные с 2006 г., и координат полюса Xp и Yp, полученные с 2009 г. Исследование точности прогноза производилось путем сравнения с результатами Морской обсерватории США (USNO), которые являются официальным прогнозом ПВЗ Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (IERS — International Earth Rotation and Reference Systems Service) [10].

Следует отметить, что для получения достоверных данных с самого начала этой многолетней работы мы использовали реальные прогнозы, вычисляемые в СНИИМ, потому что обычный метод тестирования методов прогноза ПВЗ по апостериорным данным дает завышенную оценку точности, особенно для краткосрочных прогнозов [11]. Причина этого заключается в том, что точность прогноза, в первую очередь краткосрочного, зависит не только от метода прогнозирования, но и от самого прогнозируемого ряда. При вычислении прогнозов в реальном времени, как это происходит на практике, последние точки ряда ПВЗ имеют пониженную точность, что сказывается на точности прогнозирования.

Зависимость качества прогноза ПВЗ от прогнозируемого ряда также должна учитываться при сравнении методов вычисления прогноза. Для строгого сравнения должно производиться одновременное прогнозирование разными методами одних и тех же данных. Это условие, в частности, не было выполнено при организации первой кампании IERS по сравнению точности прогнозов, вычисляемых в различных центрах обработки ПВЗ (EOP Prediction Comparison Campaign, [2, 3]). По этой причине выводы авторов, касающиеся результатов сравнения краткосрочных прогнозов, полученных участниками проекта, могут быть недостаточно обоснованными. В то же время, как показали тестовые вычисления, точность прогнозов с длительностью больше 3–4 недель обычно практически не зависит от прогнозируемого ряда ПВЗ, которые на практике достаточно близки между собой.

Для строгого сравнения прогнозов, вычисленных методом СНИИМ, с прогнозами USNO мы в качестве исходного ряда использовали данные USNO¹. Подробное описание тестовых данных приводится в разделе 3. В разделе 4 приводятся результаты сравнения точности прогнозов, сделанных в обоих центрах, которые показали преимущество метода прогноза ПВЗ СНИИМ перед методом, используемым IERS.

2. Метод прогноза ПВЗ СНИИМ. Любой метод прогноза включает в себя построение прогностической модели (функции) поведения исследуемого ряда по имеющимся измерениям (наблюдениям) на некотором интервале времени, предшествующем моменту вычисления прогноза. Обычно в практике работы служб определения ПВЗ прогностическая функция строится по довольно короткому периоду наблюдений, длительностью от одного года до нескольких лет. Такие модели позволяют учитывать только сравнительно короткопериодические вариации вращения Земли. При этом теряется важная информация о долгопериодических составляющих неравномерности вращения Земли, что ухудшает точность прогноза. По этой причине в СНИИМ предложено строить прогностическую модель с учетом всех накопленных результатов определения ПВЗ.

Метод прогноза ПВЗ СНИИМ включает в себя следующие шаги.

На первом этапе из рядов измерений ПВЗ исключаются поправки за приливные

¹<ftp://maia.usno.navy.mil/>

вариации вращения Земли. Расчет этих поправок для UT1 и координат полюса Хр и Ур производится по методике, рекомендуемой IERS [12].

На втором этапе решается задача параметрической идентификации математических моделей временных рядов ПВЗ. В качестве моделей принимаются линейные комбинации гармонических функций с различными амплитудами, периодами и фазами. Сначала из обрабатываемого ряда ПВЗ выделяются долгопериодические составляющие неравномерности вращения Земли с периодами более 20 лет на интервалах обучающей выборки до 100 лет. Периоды гармоник подбираются перебором с заданным шагом сетки, а амплитуды и фазы гармоник определяются методом наименьших квадратов (МНК) на основе обычного соотношения, например, для j -й гармоники:

$$A_j \sin(\omega_j t + f_j) = B_j \sin \omega_j t + C_j \cos \omega_j t. \quad (1)$$

Далее производится определение параметров остальных, более короткопериодических гармонических составляющих. При этом поиск и уточнение их периодов осуществляется по оригинальному алгоритму суммирования полупериодов искомым гармоническим компонент. Суммирование значений анализируемых временных рядов производится с противоположными знаками на четных и нечетных отрезках, соответствующих искомым полупериодам гармоник. Вариациями длин полупериодов достигаются максимальные значения критерия адекватности короткопериодической компоненты. После этого по найденному периоду с помощью МНК определяются амплитуда и фаза гармонической компоненты, которая исключается из анализируемого временного ряда, и в полученном остатке продолжается поиск соседних гармонических компонент. Поиск короткопериодических составляющих продолжается до достижения минимального уровня остатка временного ряда с исключенными короткопериодическими компонентами.

На следующем этапе производится уточнение прогнозов ПВЗ по методике, разработанной в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли, ФГУП «ВНИИФТРИ» (ГМЦ ГСВЧ). В основе этого метода лежит вероятностно-статистический учет кратковременных будущих изменений всемирного времени по характеру случайных возмущений на интервале известных данных ближней предыстории.

На заключительном этапе построения прогностической модели производится окончательное уточнение прогнозов с помощью модифицированного метода авторегрессии. При этом вместо самих значений прогнозируемой величины используются ее разности до шестого порядка включительно.

Окончательное значение прогноза вычисляется по формуле

$$x_p = x_g + \Delta x_t + \Delta t_s + \Delta t_a, \quad (2)$$

где x_p — прогнозное значение ПВЗ; x_g — прогноз, полученный на основе гармонической модели вращения Земли, построенной по методу СНИИМ; Δx_t — поправка за приливные вариации вращения Земли, вычисляемая по рекомендациям IERS; Δt_s — поправка, вычисляемая вероятностно-статистическим методом, разработанным в ГМЦ ГСВЧ; Δt_a — поправка, полученная с помощью разработанного в СНИИМ модифицированного метода авторегрессии.

Более детально метод описан в [7, 9]. Его программная реализация выполнена на языках программирования Фортран 90 (расчетные модули) и С++. Время, затрачиваемое на получение одного прогноза, в зависимости от режима расчета составляет от 20 с до 2 мин на компьютере класса Pentium IV.

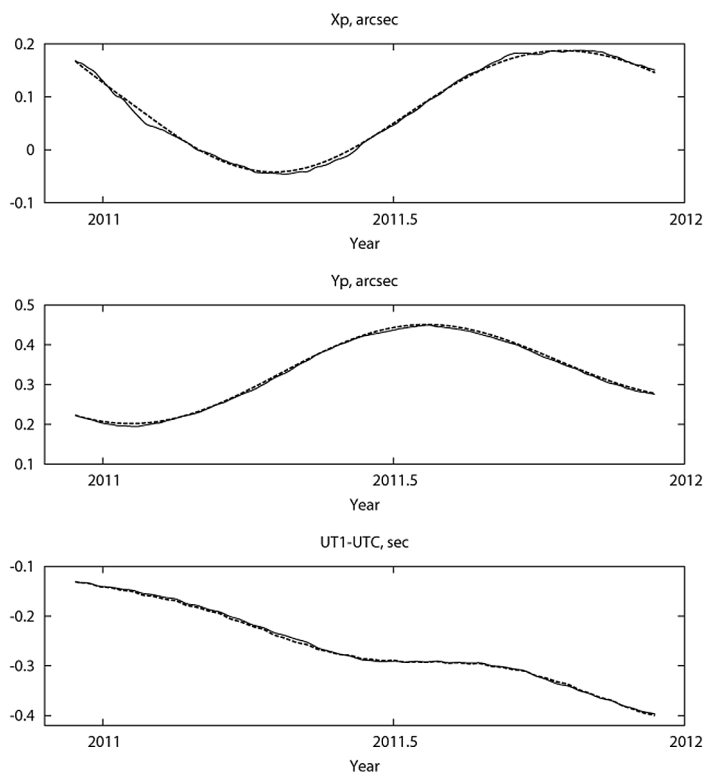


Рис. 1. Пример аппроксимации годового отрезка ряда ПВЗ моделью СНИИМ: координат полюса X_p и Y_p (секунды дуги) и всемирного времени $UT1$ (секунды).

На рис. 1 приведен пример аппроксимации реальных изменений ПВЗ моделью, построенной описанным образом. В нем использованы три последние модели для $UT1$, X_p и Y_p , используемые для вычисления прогнозов ПВЗ в настоящее время. Гармонические части этих моделей включают в себя следующие основные гармоники: для $UT1$ — 34 гармоники с периодами от 0.33 до 110 лет и амплитудами от 0.8 до 5000 мс, для X_p — 60 гармоник с периодами от 0.44 до 30 лет и амплитудами от 1.2 до 160 мсд, для Y_p — 63 гармоники с периодами от 0.46 до 66 лет и амплитудами от 0.7 до 150 мсд.

К сожалению, в силу наличия существенных нерегулярных составляющих во вращении Земли, которые пока не могут быть предсказаны с достаточной точностью теоретически, процедуру уточнения модели, описанную выше, приходится проводить несколько раз в год.

3. Описание тестовых данных. Как отмечалось выше, для исследования точности вычисления прогнозов ПВЗ методом, разработанным в СНИИМ, было выбрано сравнение с данными USNO. Ряд ПВЗ USNO обновляется ежедневно с одновременным вычислением прогноза на 90 дней. Для накопления тестовых данных в тот же день прогноз ряда USNO вычислялся в СНИИМ. Поскольку ежедневные прогнозы USNO вычисляются на 90 дней, такой же была выбрана длина прогнозов СНИИМ.

Время от времени делались прогнозы длительностью в один год, но их количество пока недостаточно для надежной статистики. Сделанные таким образом в реальном времени прогнозы USNO и СНИИМ сохранялись в СНИИМ и ГАО РАН для последующей сводной обработки.

Эта работа началась в январе 2006 г. На первом этапе в СНИИМ вычислялись только прогнозы всемирного времени с периодичностью от примерно двух раз в месяц в 2006 г. до примерно двух раз в неделю, начиная с 2008 г. С октября 2009 г. в СНИИМ было начато одновременное вычисление прогнозов координат полюса. С сентября 2010 г. в СНИИМ вычисляются также ежедневные прогнозы UT1, Xp и Yp в рамках участия в новом проекте IERS по сравнению методов прогноза ПВЗ Earth Orientation Parameters Combination of Prediction Pilot Project² (ЕОРСРРР). Для сохранения однородности данных для настоящей работы из ежедневных прогнозов были выбраны прогнозы, сделанные дважды в неделю. Последний прогноз, использованный в настоящей работе, был сделан 22 октября 2011 г. Таким образом, к настоящему времени нами были накоплены 455 пар прогнозов всемирного времени и 207 пар прогнозов координат полюса, сделанных одновременно в СНИИМ и USNO. Суммарная статистика числа прогнозов, использованных в настоящей работе, приведена в таблице.

Число прогнозов, использованных для исследования

ПВЗ	Всего	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Xp, Yp	207	—	—	—	20	101	86
UT1	455	25	65	87	91	101	86

В качестве тестового периода для вычисления точности прогноза мы брали как весь интервал накопленных данных, так и отдельные годовые интервалы. Поскольку число прогнозов Xp и Yp в 2009 г. оказалось невелико, и сделаны они были на интервале меньше трех месяцев, мы присоединили их к данным за 2010 г. В то же время также немногочисленные прогнозы UT1, сделанные в 2006 г., распределены равномерно по всему году и поэтому обработаны независимо. Данные, полученные по отдельным годам, позволяют получить более полную картину изменения точности прогноза со временем. Такой детальный анализ представляется интересным, поскольку, как показывает опыт, нередко случаются случаи, когда соотношение точности прогнозов, сделанных в разных центрах, меняется год от года [4]. Кроме того, из-за существенно разного числа прогнозов UT1, сделанных в разные годы, данные последних лет могут превалировать в суммарной статистике ошибок, полученной по всему интервалу данных.

4. Исследование точности прогноза. Для оценки точности прогноза вычисляются разности между прогнозными и окончательными значениями

$$\Delta_{ki}^l = x_{p,ki}^l - x_f, \quad (3)$$

где $x_{p,ki}^l$ — прогнозное значение, полученное в i -ом прогнозе k -го центра на длину l дней, x_f — окончательное (наблюденное) значение.

В качестве критерия точности прогноза ПВЗ в настоящее время чаще всего используются две статистики: среднеквадратическая ошибка (*RMS*) и среднее абсолютное отклонение (mean absolute error, *MAE*). Они вычисляются для каждого центра

²<http://maia.usno.navy.mil/eopcPPP/eopcPPP.html>

обработки, для каждого типа ПВЗ и для каждой длины прогноза l . Первая оценка традиционно используется в подобных исследованиях, вторая была предложена недавно [3]. Полезной может быть также оценка максимальной ошибки прогноза, т. е. максимального абсолютного отклонения, но эта статистика обычно не дает новых данных для сравнительной оценки точности прогноза ПВЗ в разных центрах, см., например [9].

RMS ошибки прогноза k -го центра на длину l дней вычисляется по формуле

$$RMS_k^l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_{ki}^l)^2}{n}}. \quad (4)$$

Поскольку x_f определяется независимо от прогнозных значений, при вычислении RMS применяется формула Гаусса, а не формула Бесселя, в которой в знаменателе стоит не n , а $(n - 1)$.

MAE вычисляется как

$$MAE_k^l = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta_{ki}^l|}{n}. \quad (5)$$

Для нашей работы в качестве основного был выбран критерий RMS , как более употребительный. Результаты вычислений представлены на рис. 2–5. Приведенные

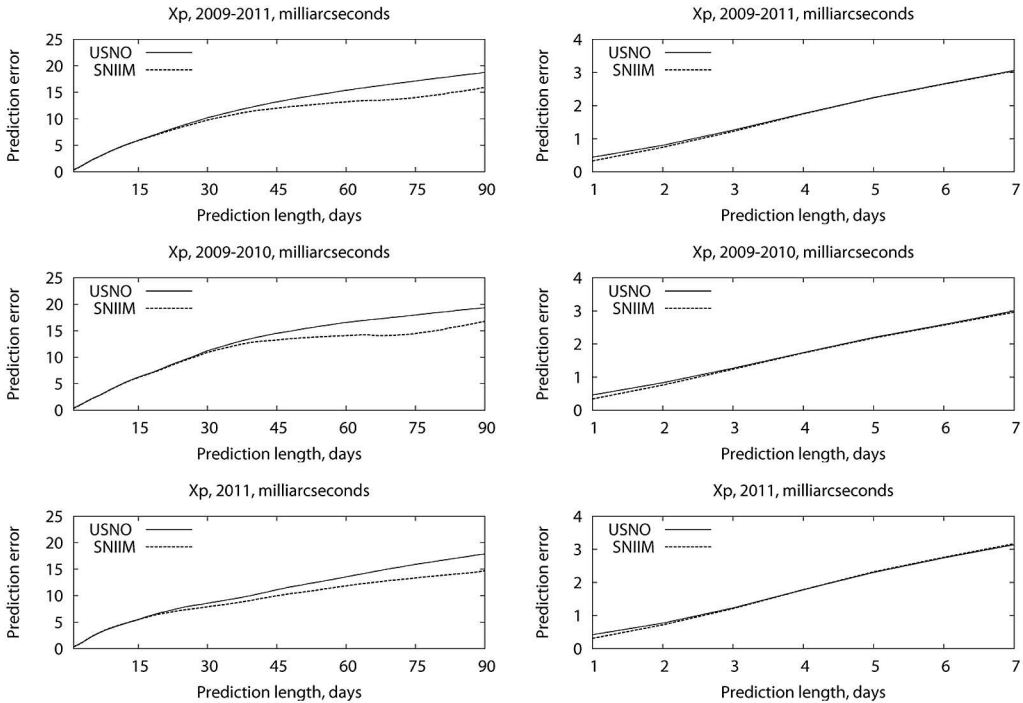


Рис. 2. Среднеквадратическая ошибка прогноза Xp, мсд, для всего исследуемого интервала и по годам. Слева приведены графики для длительности прогноза 90 дней, справа — для недельного прогноза.

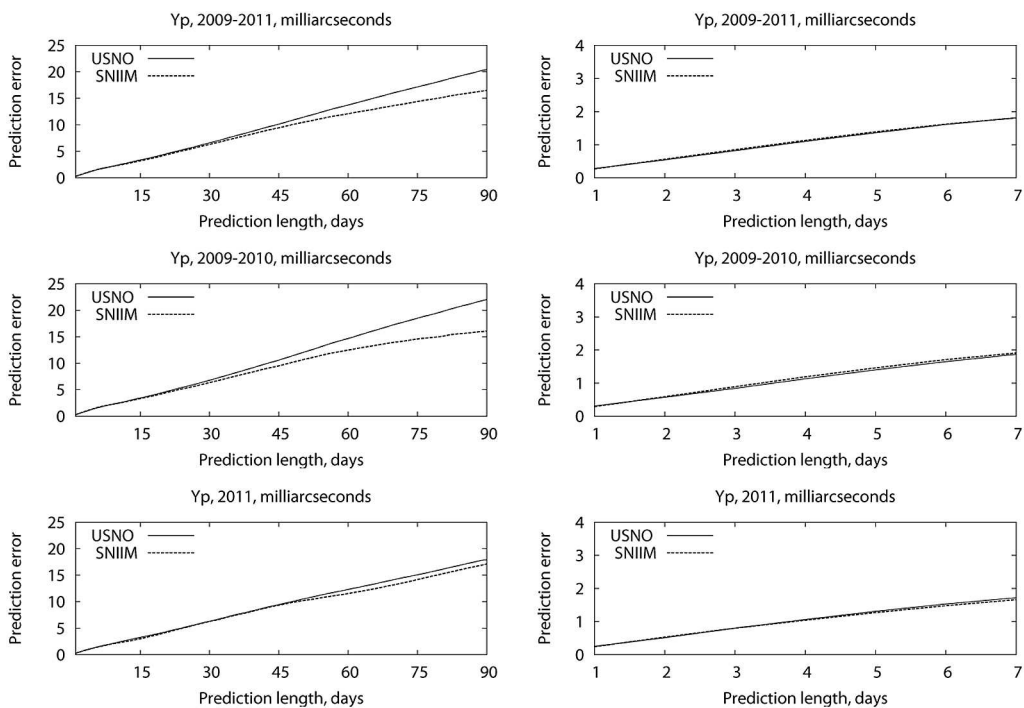


Рис. 3. Среднеквадратическая ошибка прогноза Y_p , мсд, для всего исследуемого интервала и по годам. Слева приведены графики для длительности прогноза 90 дней, справа — для недельного прогноза.

данные показывают, что точность как для краткосрочных, так и среднесрочных прогнозов, вычисленных по методике, разработанной в СНИИМ, в среднем существенно выше, чем точность прогнозов IERS. Этот вывод также справедлив почти для всех годовых интервалов.

Здесь надо отметить, что техника прогноза ПВЗ в ведущих мировых центрах обработки, включая USNO, постоянно совершенствуется, и различие точности между ними не очень велико [3]. Поэтому стабильное повышение точности прогноза даже на несколько процентов имеет практическое значение.

Интересен пример сравнения прогнозов UT1 в 2010 г. Сравнение с другими годами показывает, что точность прогнозов СНИИМ в 2010 г. находится примерно на уровне соседних лет. Зато точность прогнозов USNO в этот год оказалась примерно вдвое лучше, чем обычно. Обратная картина, хотя менее выраженная, наблюдается в 2009 г. Этот пример еще раз показывает, что точность прогнозов в разных центрах может по-разному меняться год от года, что обуславливает целесообразность разработки методов вычисления сводных прогнозов, как это предлагается в [2–4].

Все данные по точности прогнозов СНИИМ и USNO были также вычислены с критерием MAE . Как показано на рис. 6, отношение RMS/MAE остается практически постоянным для различных серий прогнозов с незначительным уменьшением, наблюдающимся с увеличением длины прогноза. Поэтому использование критериев RMS и MAE для изучения сравнительной точности прогнозов, выполненных в разных центрах, практически эквивалентно.

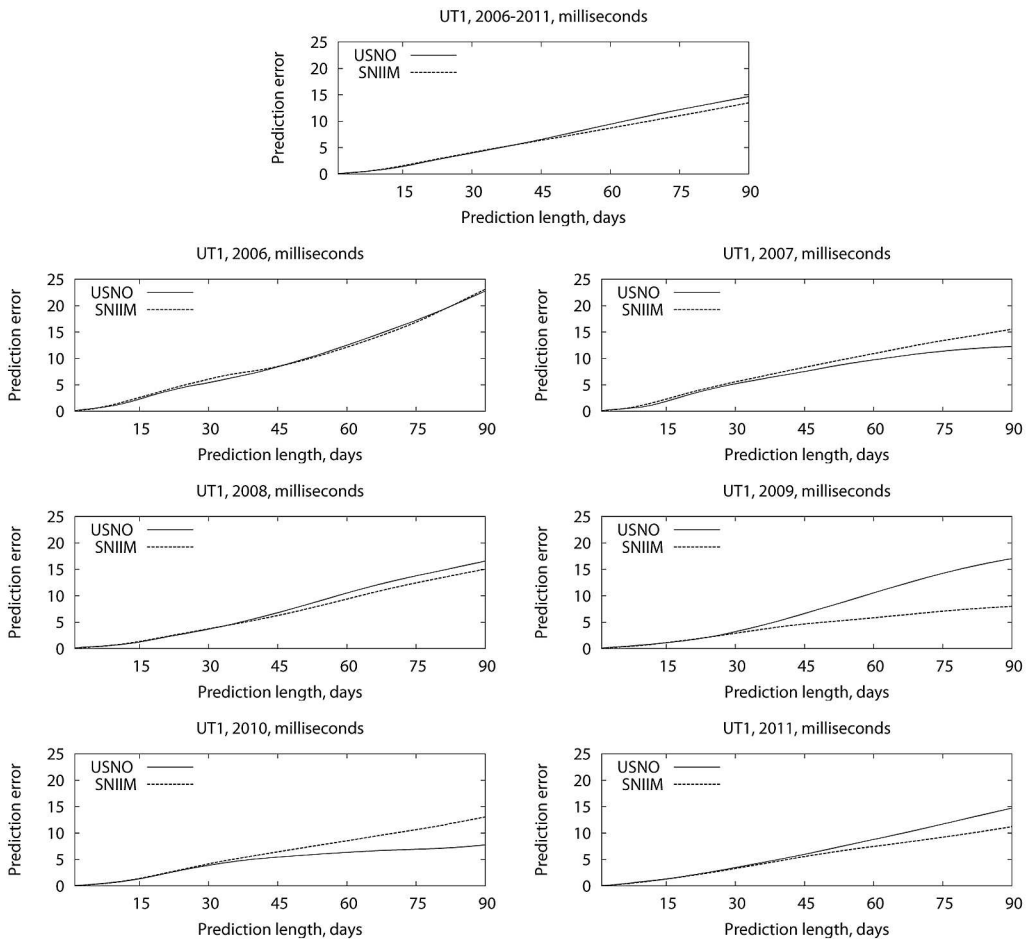


Рис. 4. Среднеквадратическая ошибка среднесрочного прогноза UT1, мс. Сверху вниз приведены графики для всего исследуемого интервала и по годам.

4. Заключение. Полученные в настоящей работе данные показывают, что точность прогнозов всемирного времени и координат полюса, вычисленных по методу СНИИМ, выше, чем точность прогнозов USNO. Этот результат подтверждается как для всего периода тестирования (6 лет для UT1 и 2 года для координат полюса), так и по отдельным годовым интервалам, что показывает устойчивое преимущество метода СНИИМ как для краткосрочных (длительностью в несколько дней), так и для среднесрочных (длительностью до трех месяцев) прогнозов. Этот результат получен строгим методом сравнения реальных одновременных прогнозов одного и того же ряда ПВЗ USNO, что обуславливает достоверность нашего вывода.

Как указывалось выше, в СНИИМ также производятся ежедневные вычисления прогнозов ПВЗ в рамках участия в проекте IERS EOPCPPP. В настоящее время в нем участвуют 8 центров вычисления прогнозов ПВЗ, которые ежедневно представляют 15 типов прогнозов координат полюса и всемирного времени. По данным первых девяти месяцев проекта в [13] произведено сравнение прогнозов, вычисляемых в СНИИМ, ОРА (Парижская обсерватория, Франция), USNO, JPL (Лаборатория реак-

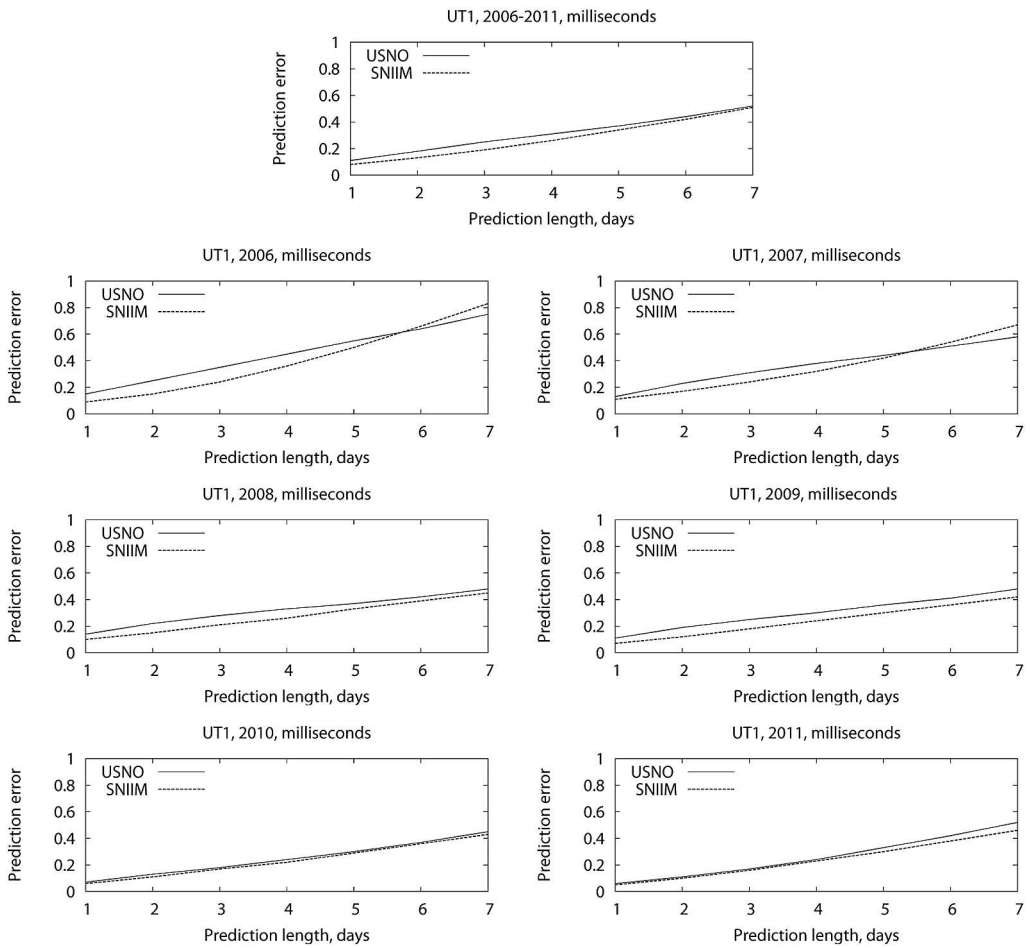


Рис. 5. Среднеквадратическая ошибка недельного прогноза UT1, мс. Сверху вниз приведены графики для всего исследуемого интервала и по годам.

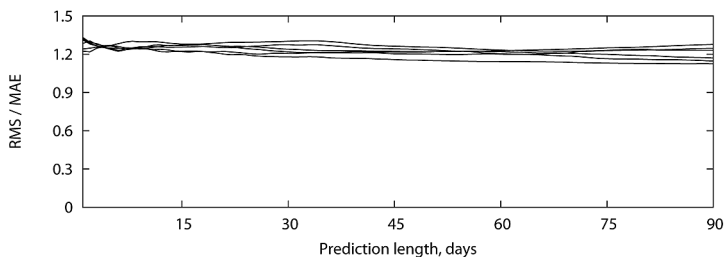


Рис. 6. Отношение критериев RMS и MAE оценки ошибки прогноза ПВЗ для двух центров обработки и трех типов ПВЗ.

тивного движения, США), и ГАО РАН, которое также показало преимущество метода СНИИМ. Полное исследование результатов ЕОРСРРР предполагается произвести в 2013 г. после окончания проекта.

Литература

1. *Luzum B.* Future of Earth Orientation Predictions // Artificial Satellites. 2010. Vol. 45. N 2. P. 107–110.
2. *Luzum B., Wooden W., McCarthy D., Schuh H., Kosek W., Kalarus M.* Ensemble prediction for Earth orientation parameters // Geophysical Research Abstracts. 2007. Vol. 9. EGU2007-A-04315.
3. *Kalarus M., Schuh H., Kosek W., Akyilmaz O., Bizouard Ch., Gambis D., Gross R., Jovanović B., Kumakshv S., Kutterer H., Mendes Cerveira P. J., Pasynok S., Zotov L.* Achievements of the Earth orientation parameters prediction comparison campaign // J. of Geodesy. 2010. Vol. 84. P. 587–596.
4. *Malkin Z.* Employing combination procedures to short-time EOP prediction // Artificial Satellites. 2010. Vol. 45. N 2. P. 87–93.
5. *Тиссен В. М., Толстиков А. С.* Методика высокоточного прогнозирования неравномерностей вращения Земли // Современные проблемы геодезии и оптики: сб. науч. ст. Новосибирск: СГГА. 2006. С. 6–11.
6. *Тиссен В. М., Толстиков А. С., Малкин З. М.* Опыт краткосрочного и долгосрочного прогнозирования параметров вращения Земли // Сб. материалов III Международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2007», 25–27 апреля 2007 г. Новосибирск: СГГА. 2007. Т. 4. Ч. 2. С. 92–95.
7. *Тиссен В. М., Толстиков А. С., Балащенко А. Ю., Малкин З. М.* Высокоточное прогнозирование всемирного времени по 100-летним данным // Измерительная техника. 2009. № 12. С. 3–6.
8. *Тиссен В. М., Толстиков А. С., Малкин З. М.* Неравномерности вращения Земли и результаты, достигнутые в их прогнозировании // Тр. Всероссийской астрометрической конф. «Пулковско-2009». Изв. ГАО. 2009. № 219. Вып. 4. С. 329–334.
9. *Tissen V., Tolstikov A., Malkin Z.* UT1 prediction based on long-time series analysis // Artificial Satellites. 2010. Vol. 45. N 2. P. 111–118.
10. *Vondrak J., Richter B.* International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) // J. of Geodesy. 2004. Vol. 77. P. 585–678.
11. *Malkin Z.* On estimate of real accuracy of EOP prediction // ASP Conf. Ser., Vol. 208, Polar Motion: Historical and Scientific Problems, Proc. IAU Coll. 178, Cagliari, Italy, Sep 27–30, 1999. Eds. S. Dick, D. McCarthy, B. Luzum. San Francisco: ASP. 2000. P. 505–510.
12. *Petit G., Luzum B.* (eds.). IERS Conventions (2010). IERS Technical Note N 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. 2010.
13. *Тиссен В. М.* Результаты прогнозирования ПВЗ по 100 летним данным в международном проекте ЕОРСРРР // Четвертая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2011), 10–14 октября 2011 г. Тезисы докладов. С.-Петербург: ИПА РАН. 2011. С. 117–119.

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2012 г.