

НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ, ДОСТИГНУТЫЕ В ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИИ

Тиссен В.М.¹, Толстикова А.С.¹, Малкин З.М.²

¹Сибирский НИИ метрологии, г. Новосибирск, Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

В статье рассмотрен новый метод прогнозирования всемирного времени – одной из наиболее актуальных задач координатно-временного, эфемеридного и метрологического обеспечения многих научных задач о Земле и практических приложений. Метод основан на построении общей гармонической модели вращения Земли и использовании модифицированного метода авторегрессии. Сравнительная оценка точности прогнозов, сделанных в СНИИМ и Международной службе вращения Земли и опорных координатных систем (IERS) в 2008-2009 гг., показала более высокую точность прогнозов, выполненных по предлагаемой методике.

1. Задача и проблемы

Задача высокоточного прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ) приобрела особую актуальность с появлением в России и США в начале 1980-х годов глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Развитие этих систем требует постоянного совершенствования программного обеспечения (ПО), что необходимо для повышения качества эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) ГЛОНАСС. Выполнение современных требований к ЭВО возможно только при условии обеспечения ПО космических аппаратов (КА) высокоточными прогнозами ПВЗ, так как они входят в начальные условия, используемые при решении дифференциальных уравнений движения КА. Особенно это актуально в случае возникновения необходимости работы навигационных систем в автономном режиме. Из ПВЗ наиболее трудно прогнозируемым параметром традиционно считается всемирное время $UT1$. Это связано со сложным характером его изменений за наблюдаемый 350-летний период, как показано на рис. 1, где приведен график изменений разностей между неравномерной шкалой всемирного $UT1$ и равномерной шкалой земного динамического времени TT .

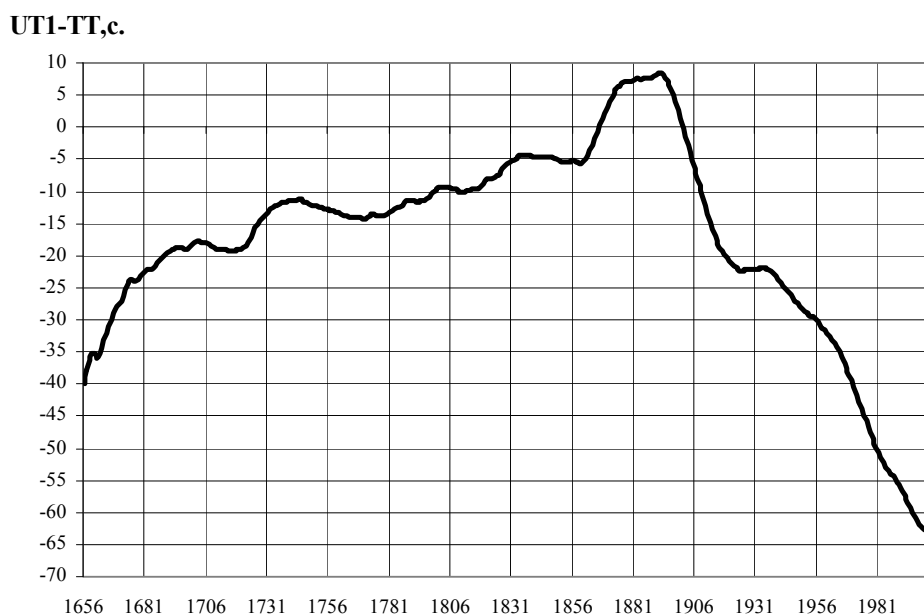


Рис. 1. Изменение разностей $UT1-TT$ за 350 лет.

Анализируя график на рис. 1, можно отметить, что за последние 100 лет не менее шести раз происходили многолетние (длительностью 10 и более лет) трендовые изменения всемирного времени кусочно-гладкого типа различной величины и направленности. Эти изменения, как и менее продолжительные длительностью в 1-2 года в настоящее время считаются практически непредсказуемыми. Природа таких трендовых изменений остается пока еще невыясненной. Предполагается, что они могут быть вызваны суммарным влиянием на процесс вращения Земли ряда нестационарных природных факторов таких как: глобальные изменения климата и уровня солнечной радиации, перераспределение масс в земных недрах после землетрясений и вулканической деятельности, вариации геомагнитного поля, турбулентные движения в ядре, конвективные течения вещества в мантии, процессы перекристаллизации в подкорковом слое и др.

К предсказуемым изменениям относятся приливные колебания от Луны и Солнца и сезонные неравномерности. Всего известно более 60 приливных колебаний с различными амплитудами и периодами. Среди них наиболее заметны составляющие с периодами год, полгода, 13,7; 27,3; 9,1 суток. Сезонные изменения обычно аппроксимируют гармоническими составляющими с амплитудами годовой волны около 20 мс и полугодовой около 10 мс.

В настоящее время разработкой и совершенствованием методов прогнозирования ПВЗ занимаются многие отечественные и мировые службы и научные институты. Официальным поставщиком прогнозов ПВЗ в России является Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), подведомственная Ростехрегулированию. Международная служба вращения Земли (МСВЗ) выставляет свои прогнозы ежедневно в Интернете на сайте Морской обсерватории США (USNO) <http://maia.usno.navy.mil/>. Этими службами публикуются прогнозы разности $dUT1 = UT1 - UTC$ между всемирным $UT1$ и координированным UTC временем.

Следует отметить, что точность краткосрочных (на 10-15 дней) прогнозов всемирного времени в МСВЗ в ГСВЧ за последние годы заметно возросла. Так, по оценкам авторов в 2008 г. СКП этих прогнозов на интервале до 15 дней составила около 1,5 и 2 мс соответственно. Тем не менее, полученные результаты в полной мере не удовлетворяют задачам дальнейшего совершенствования ЭВО ГЛОНАСС, где необходимо обеспечить среднегодовую оценку СКП около 1 мс.

Главными недостатками, которыми обладают методы, применяемые в ГСВЧ, МСВЗ и других службах, являются зависимость получаемых результатов от интервала данных и от критериев адекватности, используемых для оценивания параметров прогностической модели. Причина этого эффекта может быть в использовании ограниченных массивов данных длительностью не более 4-6 лет для определения параметров тренда и сезонных колебаний, что не позволяет достаточно достоверно учитывать нерегулярные длительные вариации всемирного времени, показанные на рис. 1.

2. Требования ЭВО ГЛОНАСС

Средние квадратические ошибки максимальных отклонений прогнозов $UT1$ $СКП_{(max)}$, рассчитанные по формуле

$$СКП_{(max)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_s} (MAX(\varepsilon_{i,j}))^2 / N_s}$$

где N_s – число прогнозов, включенных в обработку; $\varepsilon_{i,j}$ – отклонение отдельного прогноза i на интервале в j дней, не должны превосходить значений приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Требования к точности прогнозирования всемирного времени для целей ЭВО ГЛОНАСС.

Интервал прогноза, сут.	СКП _(max) прогнозов <i>UTI</i> (мс)	
	Достигнутые в ГСВЧ (2008-2009)	Требуемые
1	0,08	0,05
10	1,2	0,7
15	2,1	1.0
60	—	2–3

3. Предлагаемые пути решения проблемы

Авторами разработаны и апробированы новые методы прогнозирования всемирного времени на различные сроки. Предлагаемая методика основана на представлении ряда известных данных наблюдений *UTI* на интервале не менее 75 лет в виде суперпозиции большого числа гармоник. Такой подход в известной степени противоречит сложившейся в настоящее время точки зрения о значительно большем влиянии непериодических длительных изменений в скорости вращения Земли по сравнению с известными периодическими. Так, по данным, приведенными в [1], вклад в суммарную ошибку годового прогноза *UTI* от неучета изменения тренда составляет порядка 99% в сравнении с регулярными приливными и сезонными колебаниями. Тем не менее, полученная авторами аппроксимация трендовых изменений в виде некоторой суммы гармоник позволила существенным образом улучшить точность долгосрочных прогнозов. В табл. 2 приведены наиболее влиятельные и устойчивые периодические составляющие, выявленные при разложении тренда *UTI* в гармонический ряд.

Таблица 2. Главные составляющие трендовых колебаний всемирного времени.

Гармоника	Период (лет)	Амплитуда (мс)
1.	66,00	3500,0
2.	33,00	500,0
3.	22,00	750,00
4.	14,00	160,00
5.	10,00	50,00
6.	8,00	20,00
7.	6,00	40,00
8.	4,80	25,00
9.	3,60	15,00
10.	2,40	15,00
11.	2,00	4,00
12.	1,67	4,00
13.	1,10	2,00
14.	1,00	21,00
15.	0,90	1,00
16.	0,83	1,20
17.	0,71	1,10
18.	0,58	1,00
19.	0,50	8,00
20.	0,33	1,00

4. Техническая реализация

Технология получения прогнозов состоит в последовательном исправлении системы $dUT1$ за приливные, сезонные и другие регулярные коротко- и долгопериодические колебания. Учет океанских приливов выполнен по методике принятой в МСВЗ. Для определения параметров «трендовых» гармоник использованы известные методы оптимизации математических моделей с применением МНК и метода наискорейшего спуска, а также собственные разработки. Остаточные отклонения прогнозируются с помощью модифицированной авторегрессии [2].

Программная реализация предлагаемой методики выполнена на языках программирования Фортран-90 (расчетные модули) и С++ (интерфейс пользователя). Время, затрачиваемое на получение одного прогноза, в зависимости от режима расчета, лежит в пределах от 20 сек до 2 мин. На рис. 2 приведено изображение главного окна пользовательской программы PVZ с прогнозами МСВЗ (IERS) на 90 дней (зеленые точки, верхняя кривая) и СНИИМ (синие точки, средняя кривая) с наложенными позднее действительными значениями $dUT1$ (красные точки, нижняя кривая) от 20 апреля по 28 сентября 2009 г.

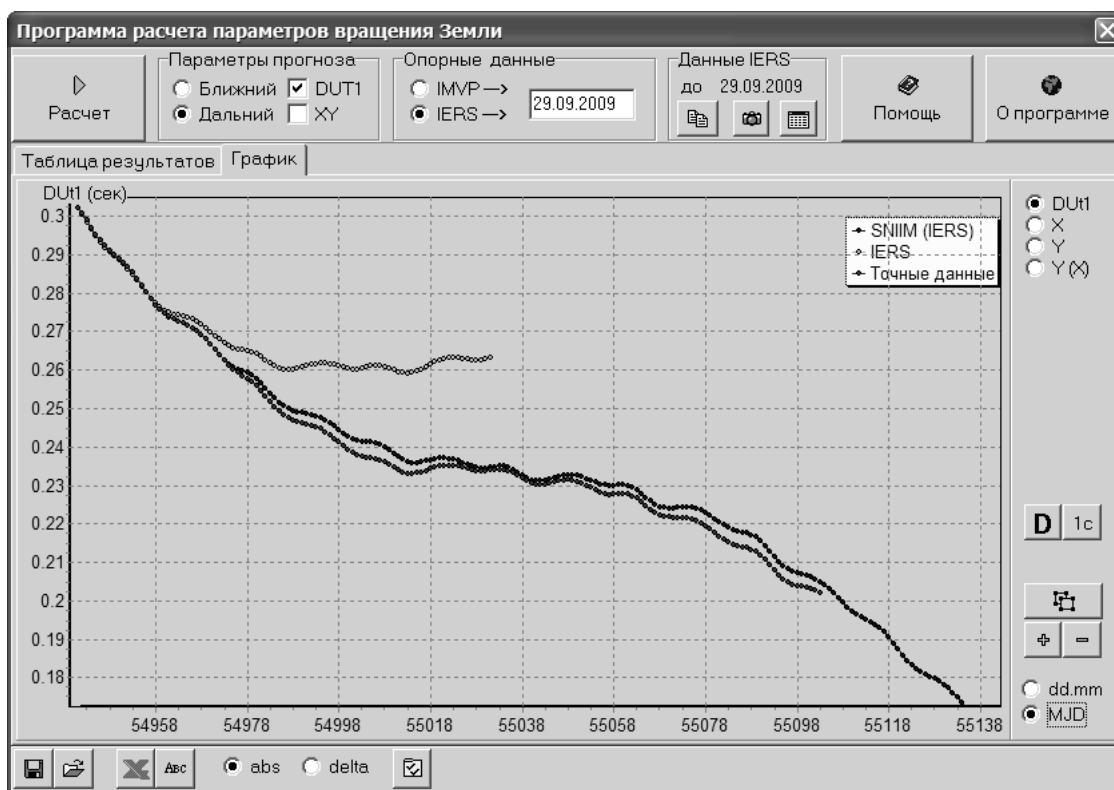


Рис. 2. Главное окно программы PVZ с прогнозами МСВЗ и СНИИМ от 20 апреля 2009 г.

5. Основные результаты

Для объективной и независимой оценки результатов представляемой методики прогнозы, вычисляемые в СНИИМ дважды в неделю и передаваемые по электронной почте в ГАО РАН, 4 ЦНИИ и ГМЦ ГСВЧ, сравнивались с прогнозами, вычисленными, в те же дни в USNO и ГСВЧ относительно опорных систем координат (МСВЗ, USNO). Прогнозы МСВЗ и ГСВЧ доступны в Интернет по адресам: <ftp://maia.usno.navy.mil/> соответственно.

Результаты сравнения за разные периоды времени приведены на рис. 3. Полученные данные показывают, что точность прогноза, по методике, разработанной в СНИИМ, выше, чем точность прогнозов в МСВЗ. Аналогичный результат был получен

в 2007 г., что показывает устойчивое преимущество представляемой методики прогнозирования всемирного времени в сравнении с методикой, применяемой в МСВЗ. Сравнивая графики СКП прогнозов $dUT1$ на рис. 3, можно также отметить положительную динамику в улучшении качества результатов полученных в 2009 г. по сравнению со всем анализируемым периодом с января 2008 по апрель 2009 г.

Прогнозы с января 2008 г. по сентябрь 2009 г.

Прогнозы с января 2009 г. по сентябрь 2009 г.

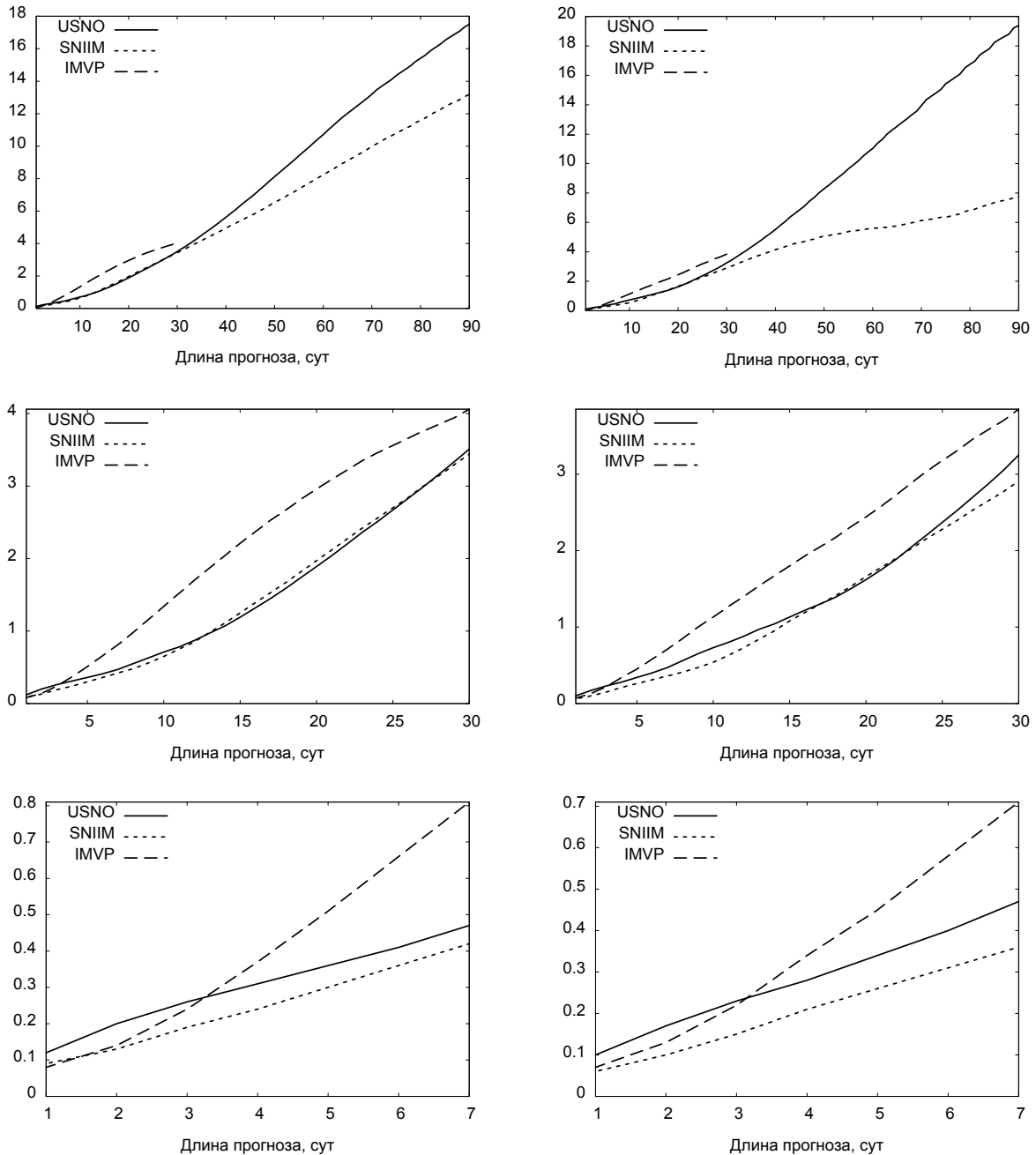


Рис. 3. СКП прогнозов всемирного времени СНИИМ, USNO и ГСВЧ (мс).

6. Выводы

1. Прогнозирование всемирного времени на интервалы не менее 1 года, можно выполнять с относительной погрешностью на уровне 5-10% , в то время как в МСВЗ соответствующая оценка в среднем близка к 30-50%. По переданным в ГМЦ ГСВЧ,

4 ЦНИИ МО и ГАО Пулково 90-суточным файлам с прогнозами всемирного времени за период с июня 2008 г по сентябрь 2009 г получены интегральные оценки СКП максимальных уклонений на интервалы 10 и 15 суток составили 0,66 и 1,15 мс соответственно. Эти результаты полностью удовлетворяют требованиям ЭВО ГЛОНАСС (1,0 и 1,5 мс) на предусмотренных интервалах автономного функционирования КА.

2. Непредсказуемые» изменения тренда – основного источника погрешностей прогнозирования можно прогнозировать путем аппроксимации известных данных dUT1 суперпозицией ограниченного числа гармонических составляющих.

3. Доминирующая в настоящее время точка зрения о преобладании стохастических изменений в скорости вращения Земли над регулярными по расчетам, выполненным с использованием данных за последние 100 лет не подтверждается.

7. Планируемая область использования

Предлагаемый метод и разработанное ПМО ориентированы на применение в задачах совершенствования ЭВО ГЛОНАСС, и в ближайшем будущем они планируются к использованию в ГСВЧ России при составлении прогнозов всемирного времени. Кроме этого, данные разработки могут быть также использованы:

- при решении задач координатно-временного обеспечения объектов, находящихся продолжительное время в местах недоступных для приема сигналов ГНСС;
- в задачах геофизики и метеорологии при построении согласующих моделей внутреннего строения Земли и глобального изменения климата;
- в ряде других задач научного и прикладного направлений, к которым относится большинство наук о Земле.

Литература

1. Белоцерковский Д.Ю., Кауфман М.Б. Оценка точности предвычислений разностей между всемирным и координированным временем с заблаговременностью до года // Исследования в области измерений времени и частоты, Труды ВНИИФТРИ, вып. 35(65), 1977.
2. Тиссен В.М., Толстикова А.С., Балахненко А.Ю., Малкин З.М. Высокоточное прогнозирование всемирного времени по 100 летним данным. Измерительная техника, в печати.

IRREGULARITIES IN EARTH ROTATION AND ACHIEVED RESULTS IN ITS PREDICTION

Tissen V.M., Tolstikov A.S., Malkin Z.M.

In this paper, a new method is proposed for prediction of the Universal Time (UT1), which is one of the actual and important tasks in Positioning, Navigation and Timing as well as in Earth sciences. The method is based on construction of a general harmonic model of the Earth rotation and modified autoregression. A comparison of UT1 predictions made at the Siberian Research Institute of Metrology and the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) in 2008-2009 has shown that proposed method provides better accuracy.