



Изучение прогресса повышения точности прогноза параметров вращения Земли в российском и международном центрах определения ПВЗ за последние 16 лет

З.М. Малкин*

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

Аннотация

В работе проведен анализ реальных прогнозов параметров вращения Земли (ПВЗ), сделанных в российской государственной службе ПВЗ (Центр обработки и анализа данных о параметрах вращения Земли Главного метеорологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли, ГСВЧ) и международной службе ПВЗ (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) в 2007–2023 годах. Рассматривались ежедневные прогнозы координат полюса Земли и всемирного времени. Всего обработаны 6021 прогноз ГСВЧ и 5684 прогноза IERS. Изучено изменение со временем медианной и максимальной ошибок для длин прогнозов 1, 3, 7, 15 и 30 дней. В результате оказалось, что за последние 16 лет не наблюдается общей устойчивой тенденции к уменьшению ошибки прогнозов ПВЗ в обоих центрах, хотя такое уменьшение хорошо заметно для отдельных типов и длин прогноза. Более того, в некоторых случаях наблюдается тенденция к ухудшению точности прогноза, особенно для максимальной ошибки краткосрочных прогнозов всемирного времени.

Введение

Параметры вращения Земли (ПВЗ) связывают земную и небесную системы координат. К основным типам ПВЗ относятся: координаты полюса Земли X_p и Y_p , определяющие положение оси вращения в теле Земли, всемирное время UT1, определяющее фазу вращения Земли относительно ее оси, и смещение координат небесного полюса, определяющие отклонение реального движения оси вращения Земли в пространстве от предсказанного теорией прецессии-нутации. Точное официальное (соответствующее рекомендациям МАС) определение этих величин приведено в Petit и В. Luzum (2010). Иногда принято, следуя западной терминологии, называть первые три параметра собственно параметрами вращения Земли, а всю совокупность указанных параметров – параметрами ориентации Земли (ПОЗ). В качестве дополнительных типов ПВЗ часто вычисляются производные от координат полюса Земли по времени и длительность суток.

Точное знание ПВЗ, которые в настоящее время определяются методами космической геодезии, в первую очередь из наблюдений внегалактических радиоисточников методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) и наблюдений спутников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), имеет большое фундаментальное и прикладное значение. Соответствующие наблюдения и вычисления ведутся в десятках институтов разных стран. Кроме того в ряде стран работают национальные службы определения ПВЗ, которые вычисляют комбинированные решения по данным различных центров анализа наблюдений. Кроме вычисления рядов ПВЗ эти центры вычисляют также прогноз ПВЗ на будущие даты, которые играют важную роль для многих практических приложений.

*e-mail:malkin@gaoran.ru

В нашей стране эту задачу выполняет Центр обработки и анализа данных о параметрах вращения Земли Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли¹ (ГСВЧ, Kaufman и Pasynok (2010)), который решает все задачи, связанные с вычислением рядов ПВЗ и их прогнозом. На международном уровне эту роль играет Международная служба вращения Земли и опорных координатных систем (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS, Vondrák и Richter (2004)). В составе IERS функционирует IERS EOP Product Center, работающий в Парижской обсерватории, который вычисляет несколько рядов ПВЗ различной длительности и временного разрешения с задержкой до нескольких недель². Кроме этого в составе IERS функционирует Центр оперативных решений и прогноза (IERS Rapid Service/Prediction Center³, Stamatakis, Davis и Shumate (2020)). Этот центр, работающий в Морской обсерватории США, является ответственным за оперативные вычисления ПВЗ (с задержкой до нескольких часов) и прогноз. Важно отметить, что в обеих службах ПВЗ, ГСВЧ и IERS, вычисление ПВЗ производится поэтапно. Сначала с высокой оперативностью вычисляются предварительные значения ПВЗ и их прогноз по ограниченному набору данных, и, возможно, по упрощенной методике, а затем по мере поступления новых данных вычисляются окончательные значения ПВЗ, доступные обычно через несколько недель.

Для прогнозирования рядов ПВЗ разработано множество методов. Однако общей проблемой для всех методов остается адекватная оценка точности прогноза. Обычным способом такой оценки является следующий. Для некоторого пробного отрезка ряда ПВЗ, вырезанному из имеющегося долговременного ряда, вычисляется его прогноз тестируемым методом так, что вычисленные прогнозируемые значения все еще попадают в пределы исходного ряда. Потом этот искусственный прогноз сравнивается с исходным рядом. Повторяя такую процедуру для многих последовательных дат начала пробного ряда можно получить усредненные оценки точности прогноза. Полученные таким способом результаты служат оценкой точности прогноза, экстраполируемой на будущие реальные прогнозы.

Однако такую методику оценки ошибок прогнозов ПВЗ нельзя признать удовлетворительной. Дело в том, что в случае реальных прогнозов, как отмечалось выше, последние точки прогнозируемого ряда не являются окончательными. Пониженная точность ПВЗ на конце оперативного ряда неизбежно влияет на качество прогноза, что исследовалось в Z. Malkin и Skurikhina (1996) и Z. Malkin (2000). Поэтому реальную ошибку прогноза можно оценить только из анализа реальных прогнозов, сопоставляя их с будущими окончательными рядами ПВЗ. Это можно сделать имея накопленный архив прогнозов. В настоящей работе используется такой архив, собираемый автором на протяжении последних лет.

В настоящей работе рассматриваются только координаты полюса Земли и всемирное время. Прогнозы углов прецессии-нутаии имеют свою специфику и рассматриваются отдельно. При этом основной задачей работы, описанной ниже, является выяснение вопроса о том, наблюдается ли заметное улучшение точности прогнозов ПВЗ ГСВЧ и IERS со временем. Такой анализ, кроме прочего, позволяет оценить эффективность мер по совершенствованию алгоритмов вычисления и прогноза ПВЗ, предпринимаемых в обеих службах ПВЗ.

1 Вычисление ошибок прогнозов ПВЗ

Для вычисления ошибок прогноза использованы ежедневные прогнозы, сделанные в ГСВЧ и IERS в 2007–2023 годах. Максимальная длина использованных прогнозов (число дней в будущее, для которых вычисляется прогноз) составляет 30 дней для ГСВЧ и 90 дней для IERS. Поэтому, для унификации результатов, прогнозы IERS обрабатывались тоже до длины 30 дней. Хотя накопление прогнозов в архиве продолжается, в настоящей работе использованы прогнозы, сделанные до 30 июня 2023 года, с таким расчетом, чтобы все прогнозируемые ПВЗ можно было

¹<https://pvz.vniiftri.ru/>

²<https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php>

³<https://maia.usno.navy.mil/>

Таблица 1: Число использованных прогнозов ПВЗ по годам.

Центр	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ГСВЧ	365	366	365	365	365	366	365	365	365	366	365	365	365	366	361	365	181
IERS	84	338	365	365	365	365	364	364	363	366	362	363	362	352	363	363	180

сравнить с надежными окончательными значениями. По различным причинам в архиве прогнозов случались пропуски, кроме того данные за 2007 имеются не с начала года. Количество имеющихся прогнозов приведено в Табл. 1 по годам. Все они были использованы в работе без исключения.

Ошибки прогнозов ПВЗ для каждого центра определялись следующим образом. Пусть мы имеем n прогнозов. Для каждого из них вычислялись разности прогнозных значений с окончательными значениями указанных выше рядов ПВЗ (с рядом ГСВЧ для прогнозов ГСВЧ и с рядом IERS для прогнозов IERS) d_{ij} , где i – номер прогноза в наборе прогнозов данного центра, $i=1 \dots n$, а j – число дней (длина) прогноза, $j=1 \dots 30$. Затем могут быть вычислены различные статистики, характеризующие ошибки прогнозов ПВЗ в зависимости от длины прогноза j . В литературе, посвященной сравнению и исследованию точности прогнозов ПВЗ, применяются несколько оценок ошибок прогноза: среднеквадратическая ошибка (Dennis D. McCarthy и Brian J. Luzum, 1991), средняя абсолютная ошибка (Kosek, D. D. McCarthy и B. J. Luzum, 1998), максимальная абсолютная ошибка (Z. Malkin и Skurikhina, 1996), и медианная абсолютная ошибка (Z. M. Malkin и Tissen, 2022). В последней работе также проведено сравнение этих оценок. При этом оказалось, что все оценки, кроме максимальной ошибки, в целом эквивалентны с точностью до постоянного фактора, хотя и имеют некоторые особенности, особенно для самых краткосрочных прогнозов. Для настоящего исследования были выбраны два критерия точности ошибок прогноза: медианная абсолютная ошибка и максимальная абсолютная ошибка.

Медианная ошибка $MedAE$ является устойчивой оценкой, не подверженной влиянию случайных удачных или неудачных прогнозов, в отличие от остальных, используемых в литературе оценок, таких как среднеквадратическая ошибка, среднее абсолютное отклонение и максимальная ошибка. Смысл медианной ошибки состоит в том, что половина прогнозов данного центра ПВЗ на данную длину имеет ошибку по модулю лучше $MedAE$, а половина прогнозов – хуже $MedAE$. Эта оценка вычисляется как

$$MedAE_j = \text{median}_{i=1 \dots n} |d_{ij}|, \quad (1)$$

Максимальная ошибка прогноза важна для практических пользователей для оценки наихудшей возможной ситуации при применении прогнозов ПВЗ данного центра. Эта ошибка вычисляется как

$$MaxAE_j = \max_{i=1 \dots n} |d_{ij}|. \quad (2)$$

Ошибки прогнозов, вычисленные указанным способом, усреднялись по годам. Полученные таким образом усредненные ошибки прогнозов отечественной и международной служб ПВЗ приведены на Рис. 1 для ГСВЧ и Рис. 2 для IERS. На этих рисунках показана зависимость среднегодовых ошибок прогнозов от времени для пяти длин прогноза: 1, 3, 7, 15 и 30 дней, а также линии линейной регрессии для годовых точек для каждой длины прогноза.

2 Заключение

В работе прослежена эволюция точности прогнозов координат полюса и всемирного времени, сделанных в российской (ГСВЧ) и международной (IERS) службах ПВЗ в 2007–2023 годах. Для этого были обработаны 6021 прогноз ГСВЧ и 5684 прогноза IERS. В качестве меры точности прогнозов использованы медианная и максимальная ошибки для длин прогнозов 1, 3, 7, 15 и 30 дней. Анализ полученных результатов вычислений, приведенных на Рис. 1 и 2, показывает неоднозначную картину.

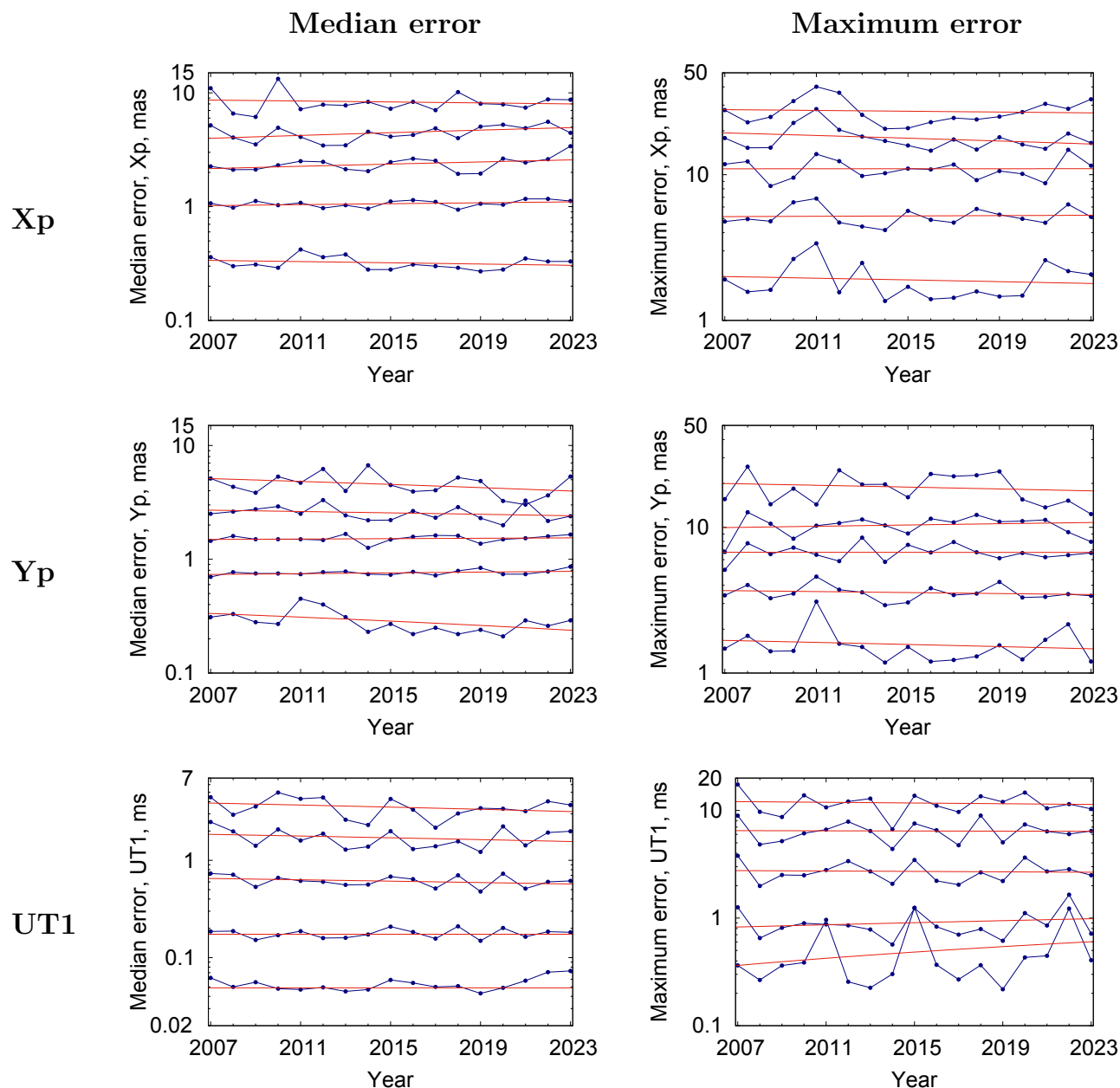


Рис. 1: Ошибки прогнозов ПВЗ ГСВЧ на длину (снизу вверх) 1, 3, 7, 15 и 30 суток. Точками обозначены ошибки прогноза, усредненные по годам. Красными линиями показана линейная регрессия среднегодовых оценок.

Медианные ошибки прогнозов координат полюса для обоих центров в целом не показывают устойчивой тенденции к уменьшению за исключением самых краткосрочных и самых долгосрочных прогнозов. При этом ошибки прогноза Y_p обычно меньше ошибок прогноза X_p и быстрее уменьшаются со временем. Это особенно заметно для прогнозов ГСВЧ. Медианные ошибки прогнозов ГСВЧ всемирного времени $UT1$ заметно уменьшаются со временем для долгосрочных прогнозов. Для прогнозов IERS, наоборот, значительное уменьшение медианной ошибки прогноза $UT1$ со временем наблюдается для краткосрочных и среднесрочных прогнозов длительностью 1–15 дней.

Максимальные ошибки прогнозов координат полюса в большинстве случаев показывают тенденцию к уменьшению в течение последних 16 лет, как для краткосрочных, так и долгосрочных прогнозов. В то же время для обоих центров наблюдается заметное ухудшение максимальной ошибки со временем для краткосрочных прогнозов всемирного времени. Причины этого ухудше-

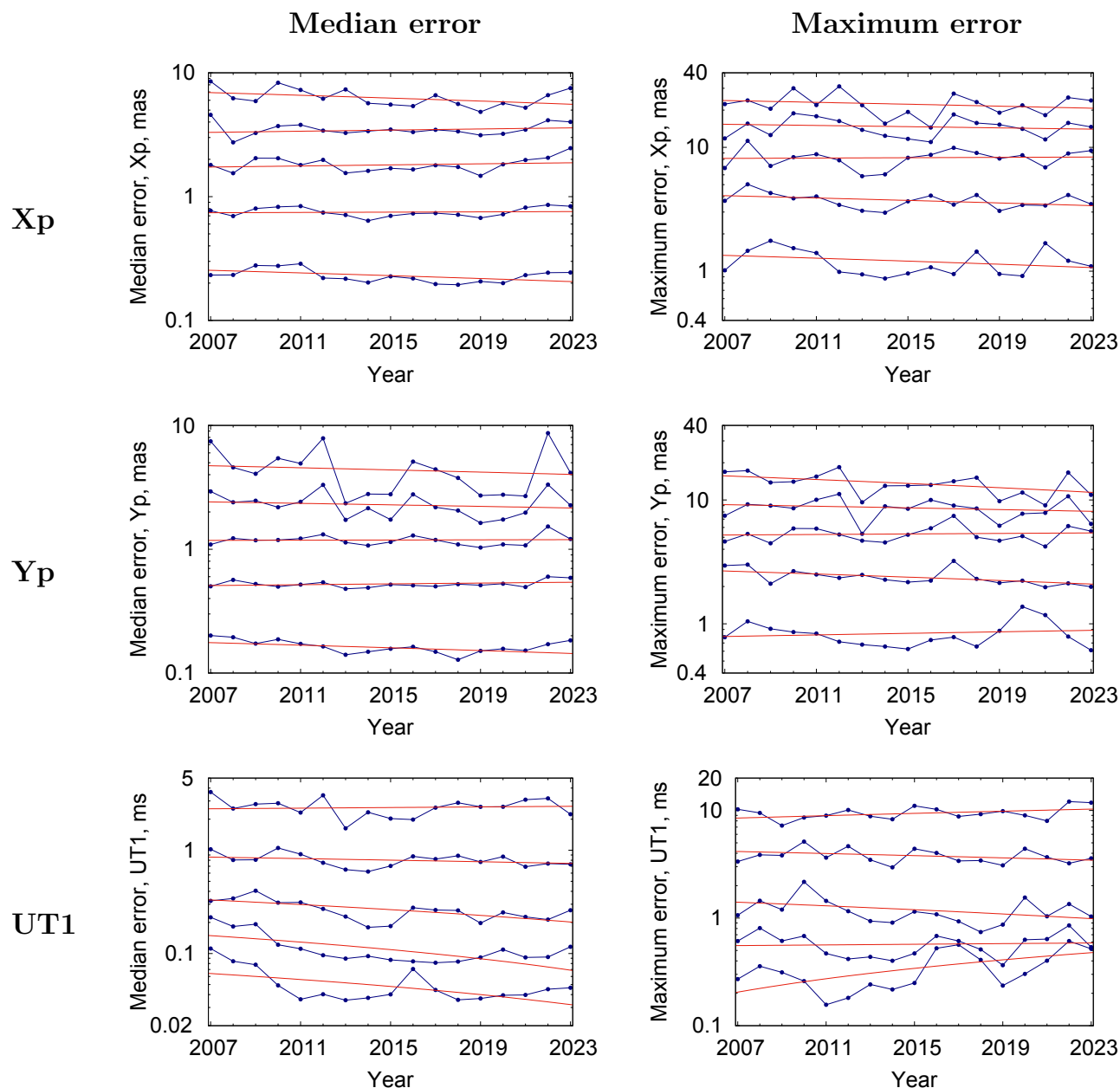


Рис. 2: Ошибки прогнозов ПВЗ IERS на длину (снизу вверх) 1, 3, 7, 15 и 30 суток. Точками обозначены ошибки прогноза, усредненные по годам. Красными линиями показана линейная регрессия среднегодовых оценок.

ния точности пока не понятны и их выяснение требует дальнейшего изучения с привлечением дополнительных данных.

В заключение интересно отметить, что даже в тех случаях, когда данные вычислений показывают явное улучшение точности прогнозов ПВЗ со временем, уменьшение ошибки прогноза происходит довольно плавно без заметных скачков, так что трудно выделить какой-то момент времени резкого улучшения качества прогноза, который мог бы быть ассоциирован с моментом изменения методики прогнозирования в той или иной службе ПВЗ.

Список литературы

- Petit, G. и B. Luzum, ред. (2010). IERS Conventions (2010). IERS Technical Note No. 36, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Kaufman, M. и S. Pasynok (2010). [Russian State Time and Earth Rotation Service: Observations, EOP Series, Prediction](#). Artificial Satellites 45.2, с. 81–86.
- Vondrák, Jan и Bernd Richter (2004). [International Earth Rotation and Reference Systems Service \(IERS\) web: \[www.iers.org\]\(http://www.iers.org\)](#). Journal of Geodesy 77.10-11, с. 585–678.
- Stamatakis, N., M. Davis и N. Shumate (2020). [IERS Rapid Service / Prediction Center products and services: improvements, changes, and challenges, 2017 to 2019](#). B: Astrometry, Earth Rotation, and Reference Systems in the GAIA era. Под ред. Christian Bizouard, с. 99–105.
- Malkin, Z. и E. Skurikhina (1996). [On Prediction of EOP](#). Communications of the Institute of Applied Astronomy RAS 93, 12 pp.
- Malkin, Z. (2000). [On Estimate of Real Accuracy of EOP Prediction](#). B: IAU Colloq. 178: Polar Motion: Historical and Scientific Problems. Под ред. Steven Dick, Dennis McCarthy и Brian Luzum. T. 208. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, с. 505.
- McCarthy, Dennis D. и Brian J. Luzum (1991). [Prediction of Earth orientation](#). Bulletin Geodesique 65.1, с. 18–21.
- Kosek, W., D. D. McCarthy и B. J. Luzum (1998). [Possible improvement of Earth orientation forecast using autocovariance prediction procedures](#). Journal of Geodesy 72.4, с. 189–199.
- Malkin, Z. M. и V. M. Tissen (2022). [Comparison of Different Estimates of the Accuracy of Forecasts of the Earth's Rotation Parameters](#). Astronomy Reports 66.1, с. 75–79.

Analysis of progress in improving the prediction accuracy of Earth's rotation parameters in Russian and international EOP services during last 16 years

Z.M. Malkin

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS

Abstract

The paper analyzes the real predictions of the Earth's rotation parameters (ERP) made in the Russian State Service of the Earth's Rotation (the Center for processing and analyzing data on the parameters of the Earth's rotation of the Main Metrological Center of the State Service of Time, Frequency and Determination of the Parameters of the Earth's Rotation, SSTF) and the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) in 2007–2023. Daily predictions of the Earth's Pole coordinates and Universal Time were considered. In total, 6021 SSTF predictions and 5684 IERS predictions were processed. The change in median and maximum errors over time for prediction lengths of 1, 3, 7, 15 and 30 days was studied. As a result, it turned out that over the past 16 years there has not been a general steady trend towards a decrease in the error of ERP predictions in both centers, although such a decrease is clearly noticeable for certain types and lengths of the prediction. Moreover, in some cases, there is a tendency to worsen the accuracy of the prediction, especially for the maximum error of short-term predictions of Universal Time.