

УДК 629.7

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ В ЗАДАЧАХ НАВИГАЦИИ С УЧЕТОМ ФЕНОМЕНА ЭВОЛЮЦИИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

© 2023 г. М. Н. Красильщиков¹, Д. М. Кружков¹, *, Е. А. Мартынов¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
*kruzchkovd@mail.ru

Поступила в редакцию 12.12.2022 г.

После доработки 11.01.2023 г.

Принята к публикации 19.01.2023 г.

В статье обсуждается применение предложенной ранее [1] методики прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ), обеспечивающей высокую точность прогноза в результате оптимизации процедуры метода наименьших квадратов, используемой для обработки соответствующих исторических данных. Приводятся результаты исследования точностных характеристик формируемых оценок ПВЗ применительно к задаче их прогнозирования на интервале с 2019 по 2022 г., когда впервые в истории наблюдения за суточным вращением Земли было зафиксировано изменение тренда зависимости разности Universal Time (UT1) и Coordinated Universal Time (UTC), вызванное уменьшением длины суток. Обсуждаются влияние тенденции изменения длины дня и сопутствующих проблем на точность прогнозирования ПВЗ в различных навигационных задачах с использованием классических полиномов, описывающих эволюцию параметров вращения Земли. Проводится сравнительный анализ точности прогноза ПВЗ, выполненного International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), для аналогичного временного периода.

DOI: 10.31857/S0023420623220028, EDN: HZMZML

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальная проблема определения и прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ), включая смещение полюса x_p , y_p и неравномерность суточного вращения в виде разницы времени UT1 (Universal Time) и координированного времени UTC (Coordinated Universal Time), неоднократно обсуждалась в значительном количестве работ [2–5] в силу ее исключительной важности в различных приложениях, связанных с задачами навигации, геодинамики и космической геодезии. Внимание авторов данная проблема привлекла в контексте решения задачи повышения точности и автономности функционирования ГЛОНАСС [6, 7]. В частности, в [8, 9] описывается информационная технология обработки данных измерений между космическими аппаратами (КА) и наземными станциями в интересах уточнения на борту навигационных космических аппаратов прогнозных значений параметров вращения Земли. Реализация этой технологии в перспективе может привести к исключению процедуры регулярной загрузки данных о реальной эволюции параметров вращения Земли на борт КА орбитальной группировки (ОГ). В рамках обсуж-

даемой технологии существенная роль отводится априорному анализу зависимостей, описывающих движение полюса и неравномерность вращения Земли, их вкладу в эквивалентную погрешность псевдодалности до потребителя (ЭППДП), а также методике прогнозирования ПВЗ на основе имеющихся апостериорных данных, обсуждаемой ниже в настоящей статье.

В [1] был развит подход к выбору оптимальных с точки зрения точности прогноза, достигаемой на длительном историческом интервале, коэффициентов полиномов, описывающих эволюцию ПВЗ. Было проведено исследование, показавшее, что в зависимости от длины требуемого интервала прогнозирования необходимо не только менять вид аппроксимируемой функции (которая бы наиболее близко соответствовала динамике обсуждаемых параметров на заданном отрезке), но и величину интервала аппроксимации, на основе обработки данных которого вычисляются требуемые значения коэффициентов используемых полиномов. Итогом такой работы и анализа результатов проведенных вычислений для длительного временного интервала (около 10 лет с 2009 по 2019 г.) стал набор параметров, включаю-

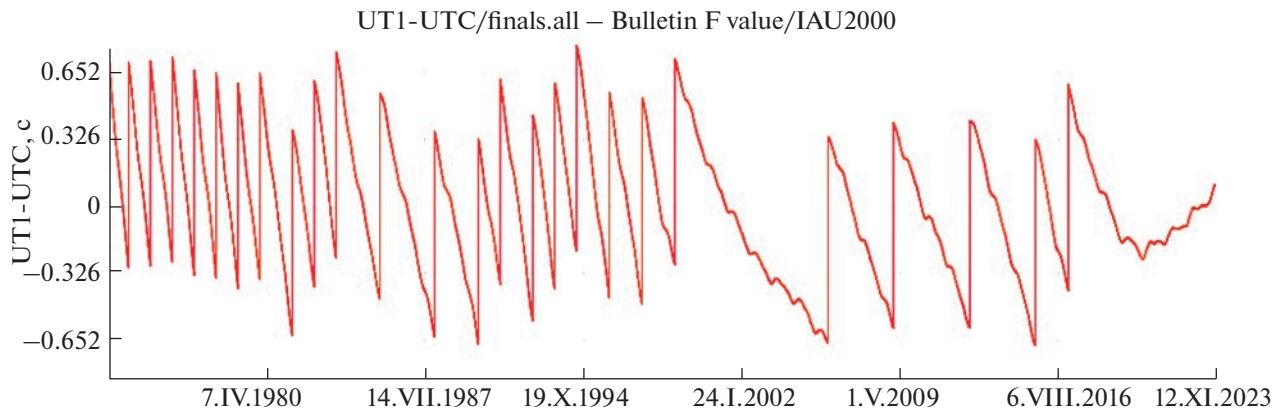


Рис. 1. Зависимость разности шкал времени UT1 и UTC.

щих для каждого из требуемых отрезков прогнозирования (например, от 5 до 90 дней) свой рекомендуемый вид функции и значение длительности интервала аппроксимации. Были получены гарантированные уровни точности прогнозирования каждого из параметров вращения Земли в рамках предлагаемой методики прогнозирования, основанной на развитом авторами подходе. Необходимо подчеркнуть, что в силу высокой неопределенности эволюции неравномерности вращения Земли именно этот параметр среди трех (x_p , y_p и неравномерность суточного вращения) предсказывается хуже всего и, как следствие, привносит наибольшую ошибку в итоговый прогноз эволюции ПВЗ и ЭППДП. В результате изменение тренда зависимости UT1-UTC (рис. 1 https://www.iers.org/IERE/EN/Home/home_node.html) в последние годы может поставить под сомнение, на первый взгляд, возможность использования предлагаемых видов полиномов и интервалов аппроксимации, так как, не взирая на тот факт, что они были определены для длительного исторического интервала (10 лет), обсуждаемый отрезок с 2019 по 2022 г. не рассматривался.

Сказанное приводит к выводу, что в интересах проверки корректности и возможного совершенствования одной из компонент развиваемой информационной технологии, “отвечающей” за прогнозирование ПВЗ, актуальной задачей является анализ точностных характеристик прогноза применительно к выбранным видам аппроксимируемых функций и длинам отрезков аппроксимации на новых временных интервалах. Прежде чем приступить к обсуждению полученных результатов, необходимо сделать следующую оговорку относительно “аномальной” эволюции UT1-UTC (DUT), а именно: если изучать не только непосредственно график данной зависимости, но и исторический график эволюции длины

дня Length of Day (LOD), то нетрудно заметить характерный для зависимости LOD синусоидальный тренд, мультиплицированный с прямой. При этом аппроксимирующая линейный тренд прямая имеет обратный наклон и пересекает нулевую (номинальную) отметку длины суток примерно в период 2022–2023 гг. (рис. 2 [10]).

Таким образом, анализируя рис. 2, можно сделать вывод, что вторая производная функции, описывающей усредненный тренд длины суток, на всем отрезке наблюдений является отрицательной. Иными словами, длина суток уменьшалась десятилетиями, при этом изначально в момент старта наблюдения за вращением Земли эта величина была больше номинального значения. Данный факт дает основание предположить, что поведение и LOD, и DUT, которая фактически является интегралом LOD (без учета добавленных секунд), нельзя назвать аномальным. Как следствие, можно допустить, что аппроксимирующие их эволюцию зависимости, равно как и полученные ранее значения параметров процедуры прогнозирования ПВЗ, оптимальны в смысле точности прогнозирования на длительном временном отрезке в рамках той методики, которая была предложена в [1]. Ниже это обстоятельство проверяется путем определения статистических характеристик точности прогнозирования ПВЗ на новом временном интервале 2019–2022 гг. с использованием полученных ранее параметров процедуры прогнозирования.

МОДЕЛИ, ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И АЛГОРИТМЫ

Прежде чем приступить к отработке описываемой технологии на новом относительно исследуемого в [1] отрезке времени с 2019 по 2022 г., кратко напомним существо процедуры исследования

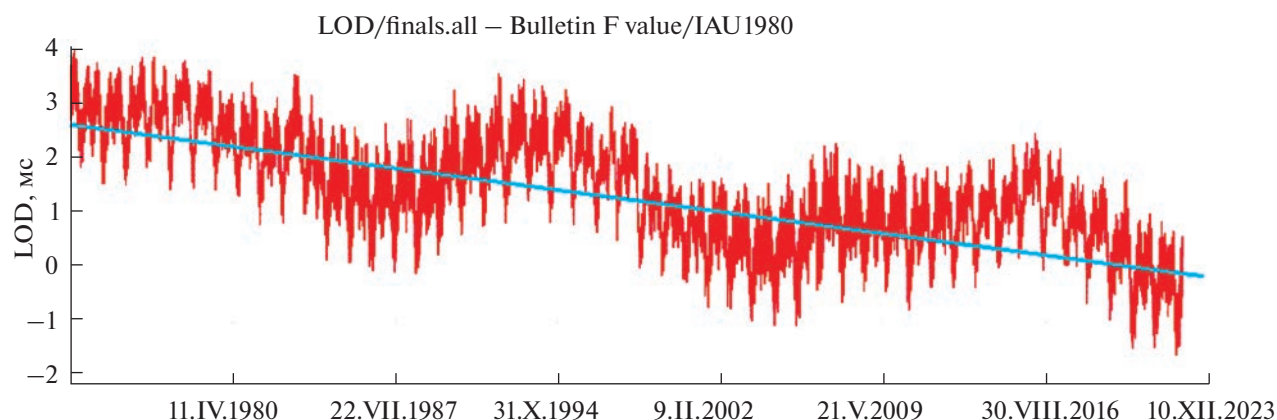


Рис. 2. Зависимость LOD.

и выбранной методики прогнозирования, которые были реализованы в соответствующем программном обеспечении (ПО). Процедура исследования включала следующие шаги:

выбор моделей для аппроксимации рядов ПВЗ, итеративный перебор используемых для аппроксимации ПВЗ моделей,

перебор значений длины интервалов аппроксимации и интервалов прогнозирования,

оценку коэффициентов полиномов на основе использования метода наименьших квадратов (МНК) и доступных апостериорных данных,

построение прогнозных рядов ПВЗ для различных длин интервалов прогнозирования,

оценку точности полученных прогнозных значений ПВЗ.

Оценка точности получаемого прогноза проводится путем сравнения прогнозных рядов ПВЗ, полученных с использованием созданного ПО, с апостериорными данными долговременных рядов ПВЗ от IERS, публикуемых в бюллетенях С04. Рассматриваемые модели, описывающие эволюцию ПВЗ, включали линейную и полиномиальную виды функций. Для сравнения использовались также и другие модели, исключенные затем из рассмотрения в связи с неприемлемыми по точности результатами. В результате описанной выше процедуры формируются таблицы соответствия минимальной ошибки прогноза и главных параметров процедуры прогноза: вида аппроксимируемой функции и интервала аппроксимации апостериорных данных.

Подчеркнем, что выбор используемого для описания эволюции ПВЗ вида полиномиальной модели до сих пор окончательно не решен. Существует ряд подходов, в рамках которых гармоника полиномов, описывающих ПВЗ, дополнены раз-

личными детерминированными аналитическими рядами, учитывающими приливы, влияние Луны и Солнца и т.д. В данной статье вопрос целесообразности выбора той или иной полиномиальной модели не обсуждается. Кроме того, в [1] уже был проведен анализ и получены оценки точности прогноза на основе используемых полиномиальных моделей (1), приведенных в ряде документов, аффилированных с IERS и National Geospatial-Intelligence Agency (NGA):

$$\begin{aligned}
 x_p &= A + B(T - T_a) + \sum_{n=1}^2 C_n \sin\left(\frac{2\pi(T - T_a)}{P_n}\right) + \\
 &\quad + \sum_{n=1}^2 D_n \cos\left(\frac{2\pi(T - T_a)}{P_n}\right) \\
 y_p &= E + F(T - T_a) + \sum_{n=1}^2 G_n \sin\left(\frac{2\pi(T - T_a)}{Q_n}\right) + \\
 &\quad + \sum_{n=1}^2 H_n \cos\left(\frac{2\pi(T - T_a)}{Q_n}\right) \\
 UT1 - UTC &= I + J(T - T_b) + \\
 &\quad + \sum_{n=3}^4 K_n \sin\left(\frac{2\pi(T - T_b)}{R_n}\right) + \sum_{n=3}^4 L_n \cos\left(\frac{2\pi(T - T_b)}{R_n}\right),
 \end{aligned} \quad (1)$$

где $A, B, C_n, D_n, E, F, G_n, H_n, I, J, K_n, L_n, R_1, R_2, T_a, T_b$ — коэффициенты, которые подлежали оцениванию при обработке апостериорных данных методом наименьших квадратов; T — дата, на которую необходим прогноз (MJD); P_1, Q_1, R_3 — длительность сидерического года; P_2, Q_2 — Чандлеровский цикл; R_4 — полугодовой цикл; R_1 — Лунный цикл; R_2 — полулунный цикл (все в днях). Так как в настоящий момент константы K и L под номерами 1 и 2 в методических рекомендациях NGA, начиная с 2005 года, обнуляются, и вместо них рассчитыва-

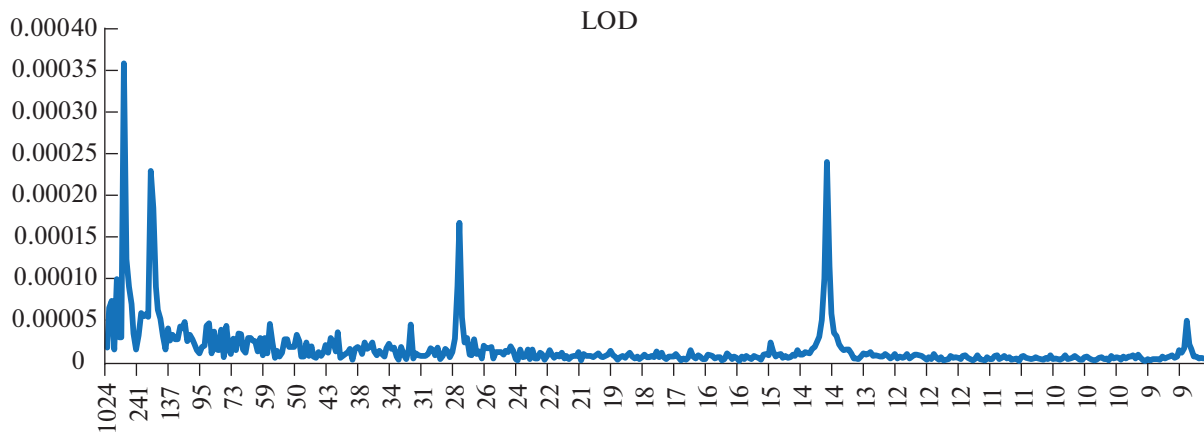


Рис. 3. Амплитуда гармоник ряда Фурье, построенного по временному ряду длины для LOD, в зависимости от выраженного в сутках периода.

ются соответствующие моделям зональных приливов значения, в (1) соответствующие гармоники отсутствуют. Однако, как показали исследования [1], использование априорных расчетных значений вместо полученных оценок коэффициентов K и L в представленном ряду приводит к ухудшению точности прогноза. В связи с этим упомянутые коэффициенты также подлежали определению в процессе исследований, а суммирование в (1) производилось для $n = 1 \dots 4$. Более подробно процедура исследования и все детали описаны в [1]. В конечном счете причинами выбора модели (1) являются, во-первых, относительная простота ее вычислительной реализации, в том числе при обработке больших объемов данных (отсутствует необходимость отдельного вычисления длинных детерминированных рядов для учета движения Луны-Солнца), и, во-вторых, как показано ниже, соответствие слагаемых модели результатам спектрального анализа. Речь идет прежде всего о DUT как о самом проблемном для прогноза параметре. Известно, что значение DUT (рис. 1) является интегралом эволюции LOD (рис. 2) за вычетом добавленных секунд. Спектральный анализ временной зависимости LOD подтверждает наличие абсолютно тех же гармоник, что используются в соотношении (1) для описания неравномерности вращения Земли, а именно: годового, полугодового, лунного и полулунного (рис. 3).

Приведем итоговую таблицу результатов, включающую полученные значения гарантируемых по уровню вероятности 0.95 ошибок прогнозирования ПВЗ, соответствующий им вид функции и интервал аппроксимации, полученные при обработке эволюции ПВЗ на интервале с 2009 по 2019 гг. Данная таблица приведена ранее в [1] и используется в качестве исходных данных для оценки точности прогнозирования на интервале 2019–2022 гг.

Результаты прогнозирования с использованием разработанной ранее методики. Ниже представлен сравнительный анализ получаемой точности прогноза ПВЗ для периода 2019–2022 гг. в сравнении с данными из табл. 1. Необходимо отметить, что, несмотря на потенциально возможно лучшие результаты, которые могли бы получиться при некоторых изменениях параметров процедуры прогноза, все интервалы аппроксимации и вид функции были выбраны в соответствии с табл. 1, так как в противном случае это исследование было бы лишено смысла. Вместе с определенными ранее параметрами получились следующие результаты (табл. 2).

На рис. 4 приведена сравнительная характеристика результатов использования декларируемых в табл. 1 параметров при прогнозировании ПВЗ на отрезке 2019–2022 гг. и на отрезке 2009–2019 гг.

Приведенные на рис. 4 результаты демонстрируют достижение аналогичного уровня точности при прогнозе на коротких периодах (до 20–30 дней), а также более высокую точность прогнозирования смещения координат полюса на длительных интервалах — от 30 дней и выше. При этом точность прогноза неравномерности вращения Земли на коротких интервалах имеет паритет между 2009–2019 и 2019–2022 гг., в то время как на длительных интервалах она ухудшилась весьма значительно (рис. 5 и 6).

Необходимо отметить, что выбор новых интервалов (см. табл. 2 с “*”) не позволил достичь той же точности прогнозирования неравномерности вращения Земли, которая была получена ранее для отрезка 2009–2019 гг., а именно: при подборе длины интервала аппроксимации выигрыш в точности прогноза достиг лишь 1–3 мс, то есть недостаточно для сохранения прежних характеристик

Таблица 1. Значения ошибок оценок эволюции x_p , y_p и (mas) и DUT (ms) при уровне доверительной вероятности 0.95 для проведенных исследований

ПВЗ	Параметр	Интервал прогноза (дни)						
		5	10	15	20	30	60	90
хр	Минимальное значение на классе аппроксимируемых функций	5.3	11.3	16.9	22.3	32	46	54
хр	Вид функции/интервал аппроксимации	л/2	л/2-8	л/6-16	л/7-14	п/680-705	п/660-680	п/735-749
ур	Минимальное значение на классе аппроксимируемых функций	3.8	7.2	11.3	15.7	26.5	45	55
ур	Вид функции/интервал аппроксимации	л/2-3	л/6-9	л/8-11	л/10-11	л/6-11	п/665-686	п/665-686
DUT	Минимальное значение на классе аппроксимируемых функций	2.4	5.9	8.6	11	14	25	38
DUT	Вид функции/интервал аппроксимации	л/2	л/2	л/2-3 или п/315-330	л/11-26 или п/300-320	п/310-325	п/315-329	п/300-320

Примечание: “л” — означает предпочтительное использование линейной зависимости для аппроксимации; “п” — полиномиальной (1). Количество дней, указанное через “/”, необходимо использовать как значение требуемого интервала аппроксимации для минимизирования ошибки прогноза на конкретном временном интервале.

Таблица 2. Гарантируемые по уровню вероятности 0.95 значения ошибок прогнозирования ПВЗ

Интервал обработки	Параметр/способ аппрокс.	День прогноза						
		5	10	15	20	30	60	90
2019–2022	x_p /“л”	5.6	11	16.5	23			
2019–2022	x_p /“п”			18	20	22.5	31	38
2019–2022	x_p /комбинация	5.6	11	16.5	23	22.5	31	38
2019–2022	y_p /“л”	3.8	7.5	11	15.5	25		
2019–2022	y_p /“п”				15	17.5	26.5	35
2019–2022	y_p /комбинация	3.8	7.5	11	15.5	25	26.5	35
2019–2022	DUT/“л”	3	7	9	11.5	18		
2019–2022	DUT/“п”			8.2	10	14.5	30	46
2019–2022	DUT/комбинация	3	7	8.2	10	14.5	30	46
2019–2022	DUT/“л”*	3	6	8.6	11.5	18		
2019–2022	DUT/“п”*			7.8	9.7	13.5	27.5	45
2019–2022	y_p /“п”*						24	33
2009–2019	x_p /комбинация	5.3	11.3	16.9	22.3	32	46	54
2009–2019	y_p /комбинация	3.8	7.2	11.3	15.7	26.5	45	55
2009–2019	DUT/комбинация	2.4	5.9	8.6	11	14	25	38

Примечание. * В данных строчках представлены результаты, полученные при подборе иных интервалов аппроксимации, дающих лучшие результаты (амплитуда изменения интервала составляла в некоторых случаях всего от 10 до 30 дней). Представленные под символом * значения приведены для оценки относительного улучшения точности прогнозирования при подборе наилучших условий аппроксимации вместо задекларированных ранее.

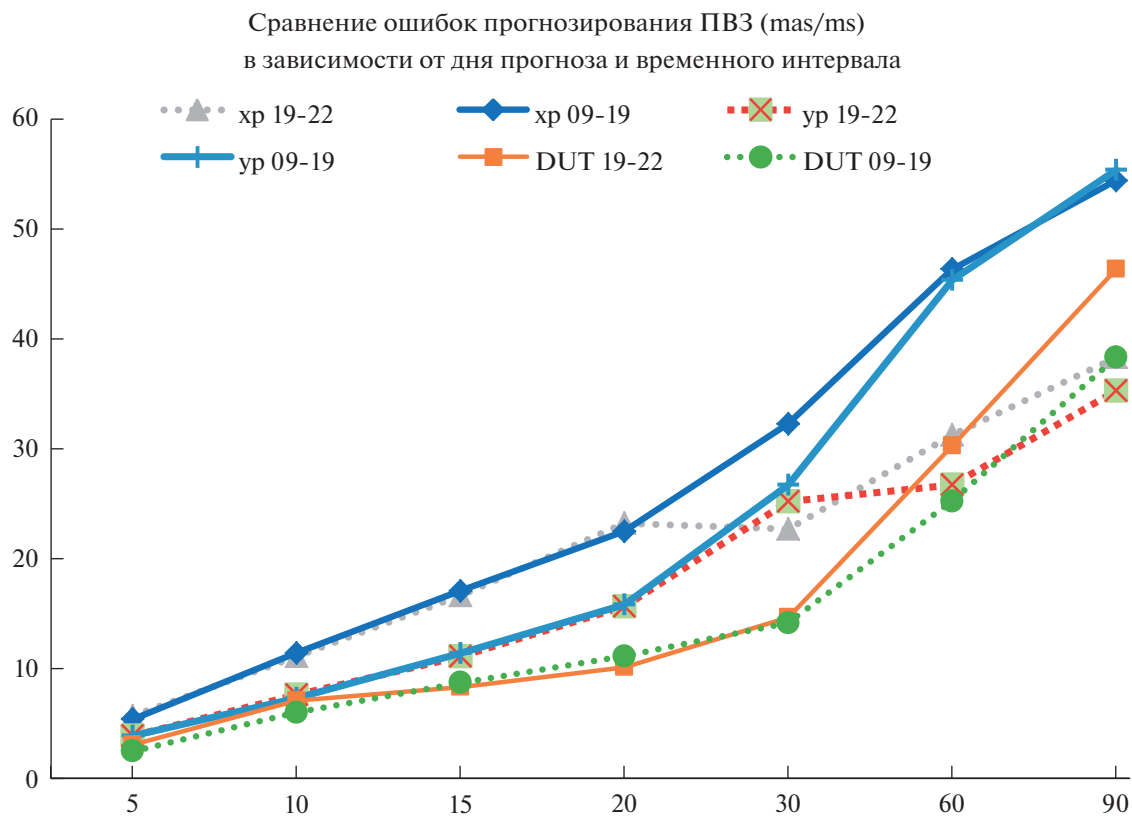


Рис. 4. Ошибки прогнозирования ПВЗ.

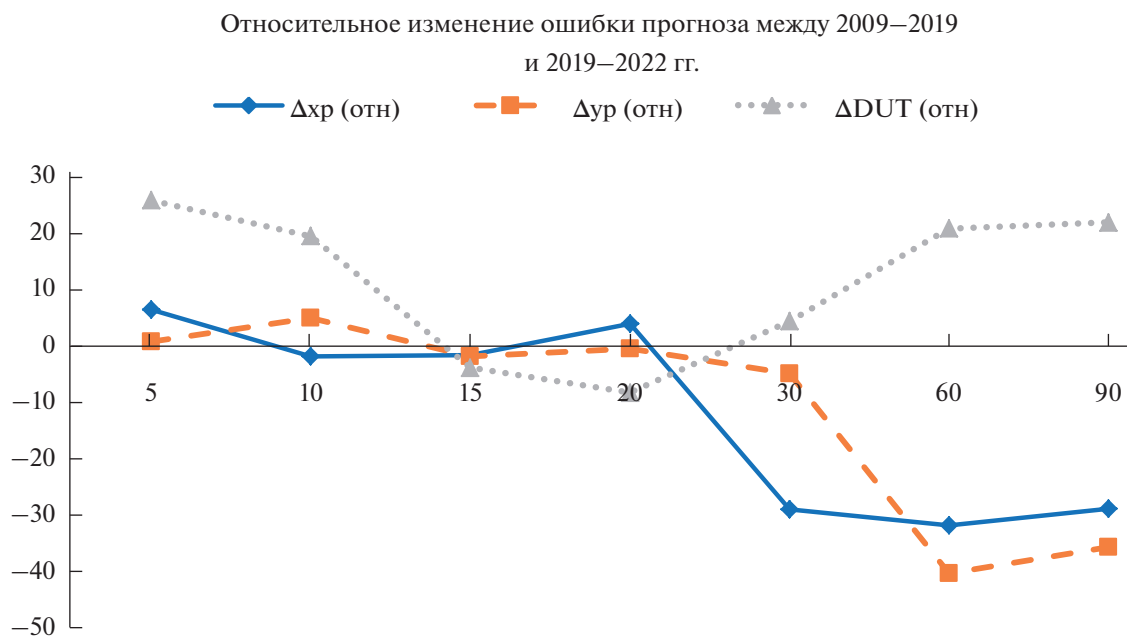


Рис. 5. Относительное изменение точности прогнозирования ПВЗ.

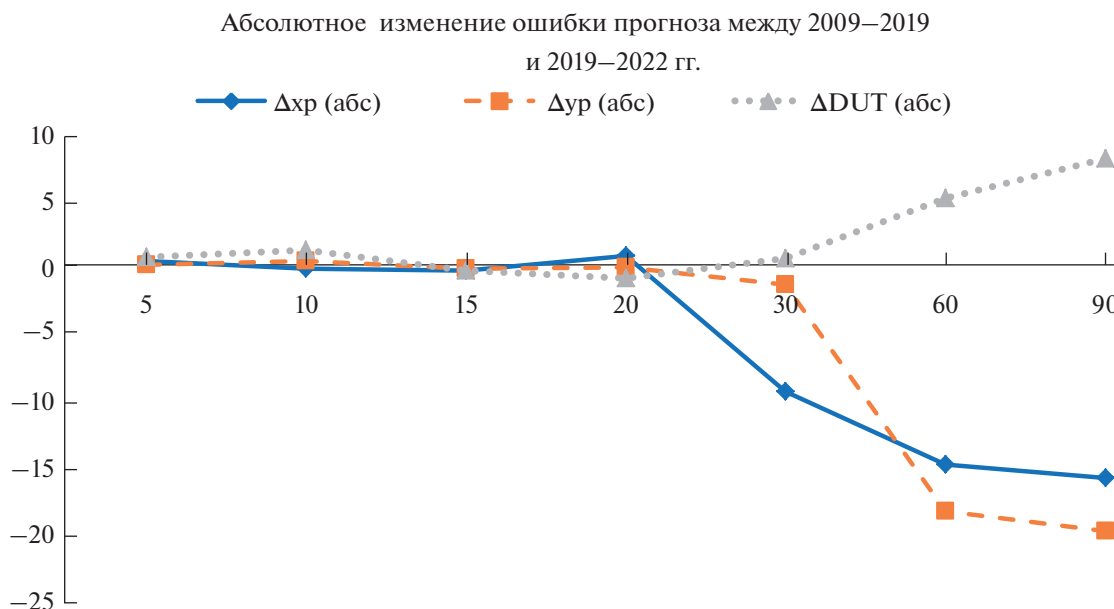


Рис. 6. Абсолютное изменение точности прогнозирования ПВЗ.

точности прогнозирования ПВЗ. Этот факт свидетельствует либо о неприемлемости используемой модели (1), либо о необходимости доработки выработанной методики прогнозирования, либо об аномалиях в тренде DUT на рассматриваемом трехлетнем отрезке 2019–2022 гг. Для того, чтобы определиться с влиянием тренда DUT на процесс прогнозирования, целесообразно, как это показано ниже, обратиться к результатам прогнозирования ПВЗ, выполненным IERS.

В то же время, результаты прогноза смещения полюса существенно улучшились в абсолютном и относительном выражении. С учетом данного феномена анализ вклада погрешности ПВЗ в эквивалентную погрешность псевдодальности рассматривается отдельно (рис. 7).

Рис. 7 демонстрирует некоторое ухудшение ЭППД за счет более существенного вклада неравномерности вращения Земли, составляющего, при использовании настроек, полученных ранее, порядка 3 м через 3 мес прогнозирования. Эта дельта снижается до 2.3 м при изменении интервалов аппроксимации. При этом в течение месяца расхождение в ЭППД между интервалами 2009–2019 гг. и 2019–2022 гг. составляет менее 1 метра, что говорит об относительной стабильности результатов, полученных для нового временного отрезка по выработанным ранее методике и значениям параметров процедуры прогноза [1].

Для того, чтобы выяснить причины ухудшения точности прогноза неравномерности вращения Земли с использованием разработанной ранее

методики, воспользуемся данными, предоставляемыми IERS, поскольку, как показывает анализ всех доступных данных, IERS демонстрирует наиболее впечатляющие результаты в области исследования геодинамики: прогнозы IERS точнее полученных с использованием разработанной авторами методики, а именно, на 90 дней ошибка прогнозирования DUT у IERS меньше полученной авторами на 10 мс (~40%). Однако, технология прогнозирования, вид используемых соотношений и другие параметры решения задачи прогнозирования IERS данных являются интеллектуальной собственностью данной организации, несмотря на значительное количество косвенно аффилированных работ. Таким образом, использовать прогноз IERS можно лишь, как и в данном случае, через публикуемые в различных бюллетенях этой организации результаты. Иными словами, факт наличия аномалий в тренде DUT может быть проведен путем оценки точности прогноза в бюллетенях.

Оценка точности прогноза IERS и анализ характера прогнозируемости DUT. Для оценки точности прогнозирования ПВЗ, изложенных во временных рядах, публикуемых IERS, было проведено соответствующее сравнение, которое заключалось в сопоставлении доступных данных из различных источников. В качестве прогнозируемых экспериментальных значений ПВЗ использовались данные из ежесуточных бюллетеней А, содержащих строки с соответствующим каждой дате прогнозных рядов ПВЗ длиной в 1 год. В каче-

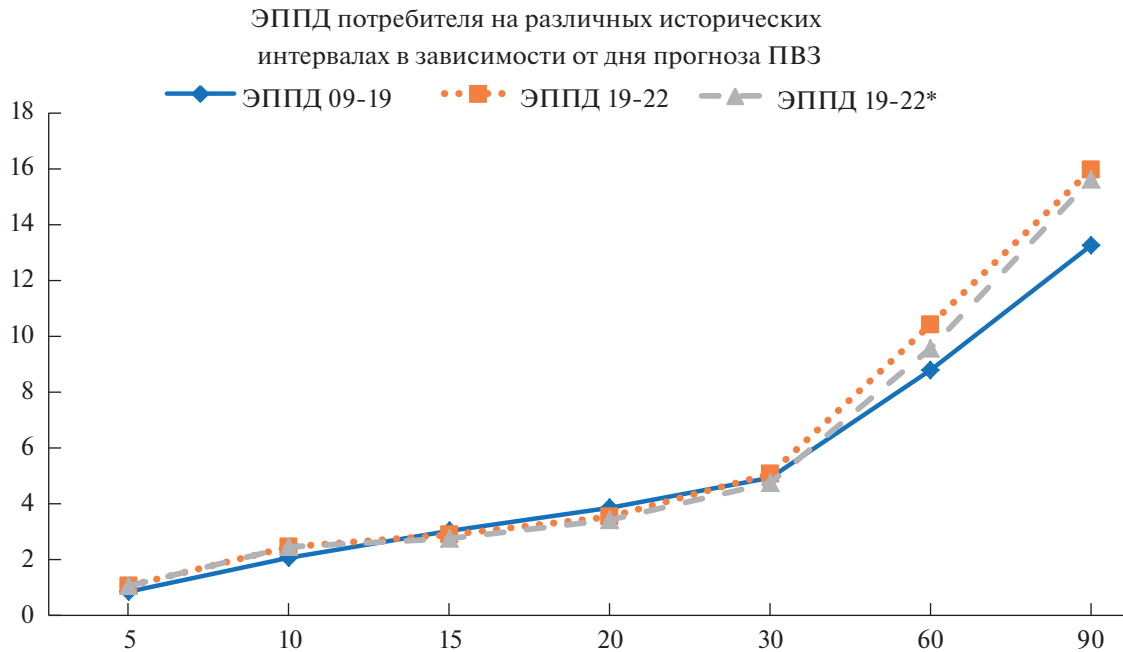


Рис. 7. Зависимость ЭПДД от длительности прогноза ПВЗ.

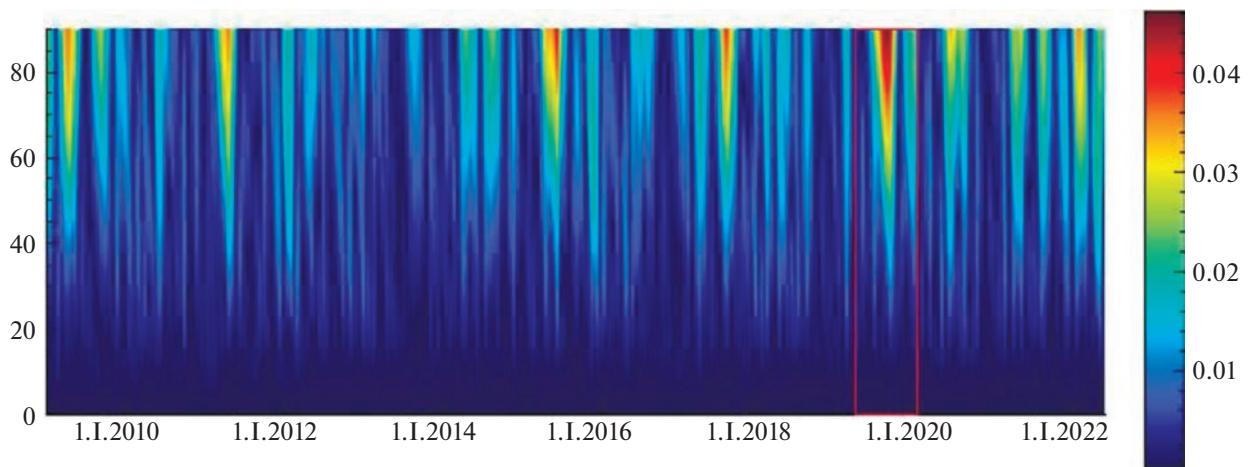


Рис. 8. Диаграмма уровня ошибок прогноза ПВЗ IERS.

стве эталонных использовались апостериорные данные IERS из бюллетеней C04. Общие результаты прогнозирования представлены ниже на цветовой диаграмме анализа.

На рис. 8 в различной цветовой гамме показано изменение точности прогнозирования DUT в зависимости от длины интервала прогноза и рассматриваемого исторического отрезка, для которого строится прогноз. Нетрудно заметить существенное ухудшение точности прогноза (рост ошибки с 20 до 50 мс), приходящегося как раз на точку в обсуждаемом интервале с 2019 по 2022 гг.

Для этого интервала (выделен на рис. 8) IERS демонстрирует при построении прогнозного ряда длиной от 30 сут почти удвоенный относительно стандартного рост ошибок. Ниже на рис. 9 представлены зависимости гарантированной по уровню 0.95 ошибки прогноза DUT в зависимости от длины интервала прогноза, построенного по бюллетеням A IERS для исторических интервалов 2009–2019 гг. и 2019–2022 гг. Заметно, что для обсуждаемого в статье диапазона дат 2019–2022 гг. характерен рост ошибок прогноза ПВЗ на длину интервала в месяц и более до 20–30% в сравнении

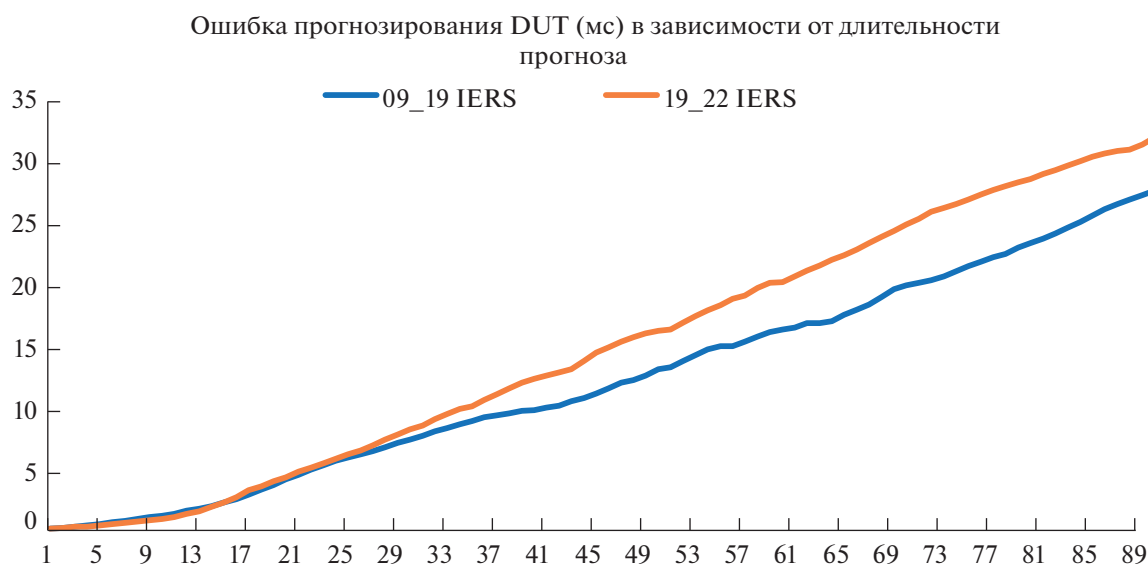


Рис. 9. Сравнение прогноза DUT по бюллетеням А IERS.

с аналогичными ошибками, полученными для диапазона 2009–2019 гг., несмотря на то, что первый интервал короче второго примерно в три раза. Данный факт говорит о наличии аномалий в привычном тренде зависимости эволюции DUT.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных в настоящей статье результатов исследований позволяет сделать следующие выводы:

- предлагаемая авторами методика прогнозирования ПВЗ демонстрирует, как показано в данной статье, стабильность и предсказуемость результатов;

- разработанная методика оптимизации процедуры прогнозирования на основе подбора вида аппроксимируемой функции и длины интервала аппроксимации в зависимости от длительности отрезка прогнозирования в целом сохраняет работоспособность на новых данных и дает сравнимые по точности прогноза результаты для будущих периодов;

- точность прогнозирования ПВЗ на будущих интервалах для предлагаемых параметров методики получается близкой к максимально достижимой точности, обеспечиваемой повторным подбором параметров процедуры прогнозирования под конкретный временной интервал;

- при использовании полученных в [1] параметров методики на интервалах до двух месяцев ухудшения точности прогнозирования ПВЗ не отмечается, что подтверждает возможность ис-

пользования предлагаемой методики прогнозирования в дальнейшем;

- феномен аномалии в тренде UT1-UTC имеет место, что подтверждается ухудшением точности прогнозирования начиная со второго месяца прогноза ее значения на отрезке 2019–2022 гг. в сравнении с прошлыми периодами при любых возможных параметрах аппроксимации и ухудшением точности прогнозирования, обеспечиваемого IERS;

- несмотря на проблемы с точностью предсказания DUT, соответствующая ЭППД с учетом ошибок прогнозирования ПВЗ остается в границах, близких к прежнему интервалу значений [1] с разницей относительно полученных ранее ее оценок не более трех метров, а на коротких интервалах (до месяца) не более метра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozorez D.A., Kruzhkov D.M., Kuznetsov K.V., Martynov E.A. Predicting the Earth orientation parameters by the least square method // Russian Engineering Research. 2020. V. 40. Iss. 12. С. 1124–1127.
2. Kosek W. Future Improvements in EOP Prediction // Geodesy for Planet Earth. International Association of Geodesy Symposia. 2012. V. 136. P. 513–520. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20338-1_62
3. Тиссен В.М., Толстиков А.С., Симонова Г.В. Прогнозирование параметров вращения Земли с помощью адаптивных гармонических моделей // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2020. Т. 25. № 4. С. 238–245.
4. Yang Y., Nie W., Xu T. et al. Earth orientation parameters prediction based on the hybrid SSA + LS + SVM

- model // Measurement Science and Technology. 2022. V. 33. Iss. 12.
5. *Xu X., Zhou Y.* EOP prediction using least square fitting and autoregressive filter over optimized data intervals // Advances in Space Research. 2015. V. 56. Iss. 10.
 6. *Толстиков А.С., Тиссен В.М.* Параметры вращения Земли в задачах эфемеридно—временного обеспечения ГЛОНАСС и результаты, достигнутые в их прогнозировании // Мир измерений. 2012. № 6. С. 43–49.
 7. *Kozorez D.A., Krasil'shchikov M.N., Kruz'kov D.M.* The Earth orientation parameters inaccuracy and spacecraft motion prediction errors. 2. GPS // Russian Engineering Research. 2020. V. 40. Iss. 12. P. 1132–1134.
 8. *Grechkoseev A.K., Krasil'shchikov M.N., Kruz'kov D.M., Mararescul T.A.* Refining the Earth Orientation Parameters Onboard Spacecraft Concept and Information Technologies // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2020. V. 59. Iss. 4. P. 598–608.
 9. *Krasil'shchikov M.N., Kruz'kov D.M.* On the Issue of autonomous refining of the Earth orientation parameters onboard spacecraft. Analysis of the possibilities of developed information technology // Cosmic Research. 2021. V. 59. Iss. 5. P. 357–365.