

В. М. Тиссен^{1}, Г. В. Шувалов²*

Анализ изменения точности прогнозов параметров вращения Земли в международной службе вращения Земли и новосибирской службе времени за последнее десятилетие

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Западно-Сибирский филиал ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: tissen@mail.ksn.ru

Аннотация. В статье проведено сравнение точности прогнозов параметров вращения Земли (ПВЗ), вычисляемых в международной службе вращения Земли (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) с 2011 по 2023 годам и в Западно-сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ». В качестве статистического материала были использованы результаты прогнозирования ПВЗ, показанные в международном проекте ЕОРСРРР, проходившем с 2011 по 2015 гг., а также данные с 2016 по 2023 гг., выставляемые ежедневно на сайтах обсерватории USNO (IERS) и вычисляемые в ЗСФ ФГУП «ВНИИФТРИ». По представленным в статье оценкам СКП прогнозов ПВЗ выполнен анализ вариаций точности прогнозов ПВЗ как от месяца к месяцу, так и от года к году, показавший, что устойчивой тенденции к повышению точности прогнозов за анализируемый, более чем 10-летний период не наблюдается. Показано, что в течение всего анализируемого периода точность краткосрочных (10–15 дней) прогнозов Всемирного времени в USNO стабильно повышалась. Однако, для координат полюса такой тенденции не обнаружено, а в ряде случаев наблюдается даже ухудшение точности прогноза.

Ключевые слова: вращение Земли, прогноз, точность, Всемирное время, методы, статистика, координаты

V. M. Tissen^{1}, G. V. Shuvalov²*

Analysis of Changes in the Accuracy of Forecasts of the Parameters of the Earth's Rotation in the International Earth Rotation Service and the Novosibirsk Time Service over the Past Decade

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

²West Siberian branch of the Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Physical and Technical and Radio Engineering Measurements», Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: tissen@mail.ksn.ru

Abstract. The article compares the accuracy of forecasts of the Earth's rotation parameters calculated in the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) from 2011 to 2023 and in the West Siberian branch of FSUE VNIIFTRI. As statistical material, the results of forecasting the parameters of the Earth's rotation (PVZ) were used, shown in the international EORCPRP project, which took place from 2011 to 2015, as well as data from 2016 to 2023. displayed daily on the websites of the USNO Observatory (IERS) and calculated in the FSF FSUE VNIIFTRI. According

to the estimates presented in the article by the UPC of the forecasts of the PVZ, an analysis of variations in the accuracy of the forecasts of the PVZ was performed both from month to month and from year to year, which showed that there is no stable trend towards increasing the accuracy of forecasts for the analyzed period of more than 10 years. It is shown that during the entire analyzed period, the accuracy of short-term (10–15 days) forecasts of World Time in the USNO steadily increased. However, no such trend was found for the pole coordinates, and in some cases there is even a deterioration in the accuracy of the forecast.

Keywords: Earth rotation, forecast, accuracy, Universal time, methods, statistics, coordinates

Введение

Интерес к прогнозированию ПВЗ, связывающих земную и небесную системы координат, сильно возрос с появлением в конце прошлого века глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Из пяти известных ПВЗ координаты полюса Земли x_p , y_p и Всемирное время $UT1$, определяющие, соответственно, положение оси вращения в теле Земли и отличие фазы этого вращения от относительно равномерного осевого вращения, принято считать основными. От точности прогнозирования указанных параметров во многом зависит качество обеспечения эфемеридно-временной информации (ИВИ), предоставляемой потребителям в режиме реального времени. В зависимости от решаемых практических задач, требуются прогнозы ПВЗ на разные сроки. В частности, для оперативной поддержки работы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) необходимы краткосрочные прогнозы на 1–7 дней. В случаях же вынужденного перехода ГНСС на автономный режим функционирования дальность прогнозов увеличивается от 2 недель до двух месяцев.

Требования точности прогнозирования ПВЗ на двухнедельный интервал, записанные в программе развития ФЦП ГЛОНАСС до 2030 года, составляют порядка 1,4 мс для Всемирного времени и 10 мс дуги для координат полюса [1]. Обеспечение таких результатов требует дальнейшего развития и совершенствования применяющихся методов прогнозирования ПВЗ. В данном случае важным условием обеспечения должной точности вычисления прогнозов ПВЗ является оптимальный выбор метода прогнозирования, в зависимости от специфики временного ряда, на котором оцениваются параметры той или иной прогностической модели. Одни методы могут давать хорошие результаты на одних участках ряда и плохие на других, а другие, наоборот, плохие там, где другие дают хорошие. Поэтому проведение сравнительного анализа по точности принятых в различных службах методов прогнозирования ПВЗ представляет интерес с точки зрения повышения стабильности результатов при условии перехода на комбинированные методы, адаптированные к динамике исследуемого ряда ПВЗ. С этой целью под эгидой IERS с 2006 по 2015 гг. уже дважды проводились международные кампании по сравнению результатов прогнозирования ПВЗ, вычисляемых различными методами. Итоговые результаты этих кампаний приведены в работе [2].

Методы и материалы

Сложный характер изменений рядов ПВЗ является основным препятствием для их успешного моделирования на ЭВМ. По этой причине разработаны разнообразные статистические и аналитические методы прогнозирования, основанные на поиске закономерностей в исследуемых рядах ПВЗ в прошедшей истории и передачи их в будущее. В мировых и отечественных центрах обработки данных ПВЗ применяются разные методы прогнозирования. В службе IERS, представляемой военно-морской обсерваторией USNO, применяются детерминированные модели, в которых главные расчетные параметры и критерии задаются согласно принятым правилам и рекомендациям [3, 4]. В частности, для Всемирного времени параметры тренда оцениваются на интервалах от двух до пяти лет. Для оценки параметров сезонных вариаций, представленных в виде суммы годовой и полугодовой гармоник, построена эмпирическая модель путем усреднения амплитуд и фаз сезонных вариаций на многолетних интервалах наблюдений. При этом, как показано на рис. 1, сезонные вариации для отдельно взятого года заметно отличаются от среднестатистической картины.

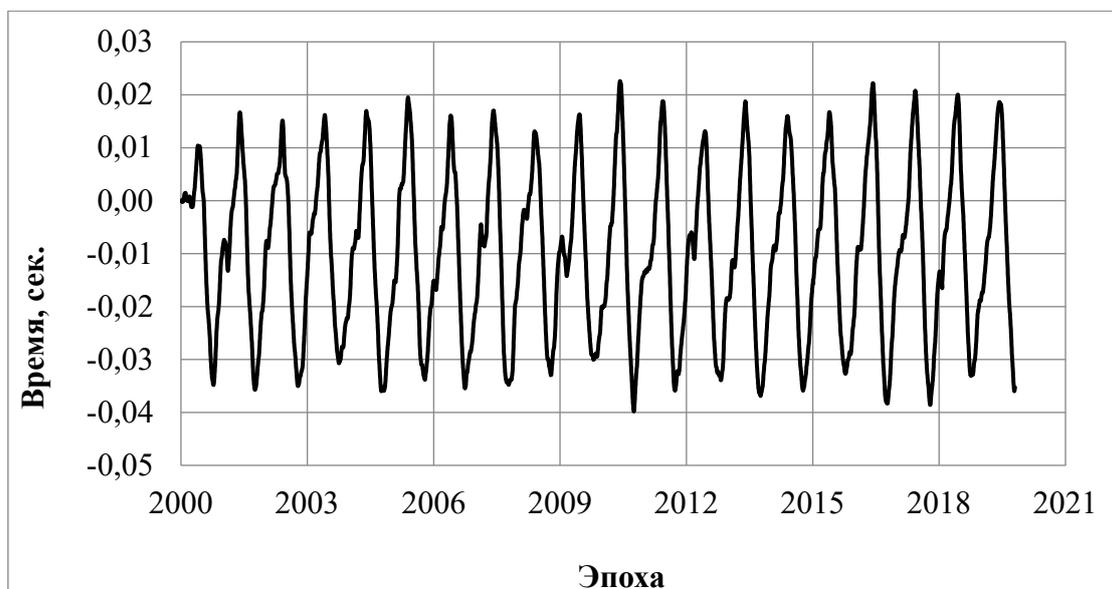


Рис. 1. Сезонные вариации для отдельно взятого года

На рис. 2 показан уход Всемирного времени $UT1$, по отношению к равномерному динамическому времени TT с 1656 по 2020 гг., характеризующий картину трендовых изменений в изменениях параметра Всемирного времени. Для построения графика использованы данные с сайта IERS [5].

Из анализа графика на рис. 2 следует, что на протяжении всего 370-летнего времени скорость вращения Земли испытывала нерегулярные изменения. Особенно это проявилось в конце 19 века, когда произошло ее значительное замедление, соответствующее уходу графика Всемирного времени на рис. 2 вниз. Оче-

видно, что такое изменение тренда в уходе Всемирного времени является абсолютно непредсказуемым.

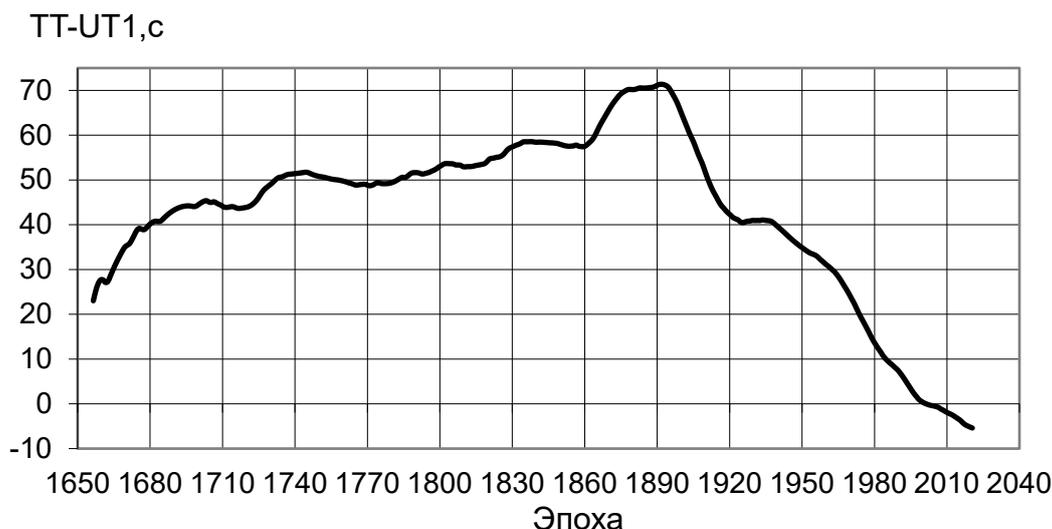


Рис. 2. Разности Всемирного и динамического времени с 1656 по 2020 гг.

В резолюциях IERS, изложенных в [4], приведены алгоритмы внесения поправок в осредненные модели сезонных и трендовых вариаций, вычисляемых эмпирически по данным текущих измерений. За счет этого достигается существенное повышение точности прогнозов ПВЗ. Кроме поправок за колебания тренда и нестабильности сезонных вариаций в прогностические модели Всемирного времени вносятся поправки за океанические приливы от Луны и Солнца, вычисляемые по аналитическим алгоритмам в соответствии с методикой, приведенной в [4, 6]. Из 62 приливных гармоник выделяются гармоники, связанные с орбитальным движением Земли вокруг Солнца, аппроксимированные годовым и полугодовым периодами, а также лунные периоды: 13,7; 27,3; 9,1 суток. Для повышения точности краткосрочных прогнозов 7–10 дней дополнительно используется геофизический фактор, возникающий вследствие воздействия на угловую скорость вращения Земли углового момента ветров и перемещения масс воды в атмосфере в виде выпадения осадков.

На конечном этапе вычисления прогноза с целью минимизации непрогнозируемой случайной составляющей изменений ПВЗ применяются различные методы сглаживания. К числу наиболее популярных из них относятся: проинтегрированное скользящее среднее, простое экспоненциальное сглаживание.

Помимо детерминированных моделей, применяющихся в IERS в ряде других мировых служб времени, нашли широкое применение методы средней квадратической коллокации (СКК), сингулярного спектрального анализа и искусственные нейронные сети [7–9]. В Лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory, JPL) для краткосрочного прогноза Всемирного времени хорошие результаты показало применение фильтрации Калмана в сочетании с использованием геофизических данных, а именно, рядов атмосферного углового

момента [10]. В то же время, при прогнозировании координат полюса лучшие результаты достигаются путем аппроксимации временных рядов многокомпонентной гармонической моделью, параметры, которой оцениваются с помощью МНК, а для формирования окончательного прогноза используется уравнение авторегрессии [11].

В нашей стране задачу определения и прогнозирования ПВЗ выполняет центр обработки и анализа данных о параметрах вращения Земли Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли [12].

В ЗСФ ФГУП «ВНИИФТРИ» для формирования долгосрочного прогноза Всемирного времени и координат полюса применяются полигармонические модели, аппроксимирующие трендовые и квазипериодические колебания, параметры которых оцениваются на различных по длине интервалах предыстории с последующим объединением по разработанным алгоритмам в полную прогностическую модель. Для формирования окончательных прогнозов применяется модифицированное уравнение авторегрессии, учитывающие корреляцию не только между смежными данными ПВЗ, но и их производными до второго порядка. Описание данной методики и алгоритмов приведено в работах [13, 14].

Результаты

В табл. 1 приведены осредненные за 5-летний период проведения компании СКП прогнозов Всемирного времени и координат полюса на выборочные интервалы прогноза службы времени ЗСФ ФГУП «ВНИИФТРИ» и IERS (USNO), опубликованные в работе [15].

Таблица 1

СКП прогнозов ПВЗ в ЗСФ ВНИИФТРИ и USNO с 2011 по 2015 гг.

Параметр	Дни прогноза					
	Участники	1	10	30	60	90
UT1-UTC, мс	ЗСФ ВНИИФТРИ	0,057	0,63	2,90	6,60	9,75
	USNO	0,060	0,62	3,12	7,20	11,55
X, mas	ЗСФ ВНИИФТРИ	0,340	3,60	9,70	15,90	20,50
	USNO	0,370	4,00	10,00	17,20	23,40
Y, mas	ЗСФ ВНИИФТРИ	0,290	2,60	7,30	11,20	16,10
	USNO	0,320	2,70	7,70	12,30	18,30

Из сравнения приведенных в табл. 1 оценок погрешностей видно, что по всем трем ПВЗ методика, применяемая в ЗСФ ВНИИФТРИ, показала более качественные результаты. При этом, с увеличением дальности прогноза преимущество в качестве прогнозов ЗСФ ВНИИФТРИ неуклонно возрастает. Аналогичная тенденция сохраняется и в последующие годы.

В табл. 2–4 приведены осредненные годовые оценки СКП прогнозов ПВЗ на выборочные интервалы: 1; 15; 30; 60; 90 дней с 2016 по 2023 гг.

Таблица 2

Сравнение среднегодовых оценок СКП прогнозов Всемирного времени с ЗСФ ВНИИФТРИ и USNO с 2016 по 2023 гг.

Год	Дни прогноза		1	15	30	60	90
	Участники						
2016	ЗСФ ВНИИФТРИ, мс		0,10	1,16	3,35	7,13	12,47
	USNO, мс		0,11	1,22	3,59	6,42	10,14
2017	ЗСФ ВНИИФТРИ, мс		0,08	1,21	3,43	8,54	14,08
	USNO, мс		0,08	1,23	3,64	9,72	14,67
2018.	ЗСФ ВНИИФТРИ, мс		0,07	1,28	3,59	7,16	9,44
	USNO, мс		0,06	1,32	4,17	8,33	11,34
2019	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,06	1,19	3,95	7,13	13,87
	USNO, мс		0,06	1,27	3,97	6,42	12,14
2020	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,07	1,41	3,83	7,54	17,08
	USNO, мс		0,07	1,25	3,86	9,72	15,67
2021	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,08	1,21	3,39	6,16	8,74
	USNO, мс		0,07	1,31	4,07	8,33	12,52
2022	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,12	1,36	3,65	6,54	10,58
	USNO, мс		0,11	1,30	3,94	9,72	15,67
2023	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,12	1,08	3,19	7,16	10,14
	USNO, мс		0,13	1,28	3,47	8,33	14,44

Таблица 3

Сравнение среднегодовых оценок СКП в mas прогнозов ЗСФ ВНИИФТРИ и USNO координаты полюса X с 2016 по 2023 гг.

Год	Дни прогноза		1	15	30	60	90
	Участники						
2016	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,34	4,83	7,05	10,07	13,56
	USNO		0,34	4,80	7,31	10,70	12,51
2017	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,29	5,20	8,01	13,94	17,43
	USNO		0,34	6,05	10,92	17,59	25,92
2018	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,31	5,43	9,02	13,11	15,91
	USNO		0,28	5,01	9,89	15,76	20,61
2019	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,29	5,33	8,85	13,17	17,06
	USNO		0,30	5,60	9,31	16,70	22,51
2020	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,28	4,83	7,05	10,07	13,56
	USNO		0,31	4,98	9,31	14,70	18,51
2021	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,29	5,20	8,01	13,94	17,43
	USNO		0,34	5,55	11,62	19,59	28,92
2022	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,36	5,46	7,05	9,07	11,28
	USNO		0,38	5,90	9,31	17,70	22,51
2023	ЗСФ ВНИИФТРИ		0,34	5,20	8,47	14,76	21,23
	USNO		0,38	6,27	12,82	21,59	32,92

Имеющийся статистический материал для сравнения качества прогнозов ЗСФ ВНИИФТРИ и USNO накоплен, благодаря ежедневной передаче 90-суточных файлов с прогнозами ПВЗ в главный метрологический центр ГСВЧ России (г. Москва), а также ежедневно сохраняемых файлов USNO: finals2000A.daily.

Таблица 4

Сравнение среднегодовых оценок СКП в mas прогнозов ЗСФ ВНИИФТРИ и USNO координаты полюса Y с 2016 по 2023 гг.

Год	Дни прогноза					
	Службы	1	15	30	60	90
2016	ЗСФ ВНИИФТРИ	0,27	3,56	6,29	10,88	14,21
	USNO	0,26	3,57	6,50	11,89	15,90
2017	ЗСФ ВНИИФТРИ	0,26	3,40	5,67	11,11	17,03
	USNO	0,24	3,50	6,29	12,63	17,96
2018	ЗСФ ВНИИФТРИ	0,26	3,69	6,46	11,60	17,86
	USNO	0,22	3,49	5,69	9,03	12,61
2019	ЗСФ ВНИИФТРИ	0,25	3,66	5,99	10,88	12,01
	USNO	0,26	3,27	5,80	12,89	16,90
2020	ЗСФ ВНИИФТРИ	0,22	3,05	4,95	7,91	10,49
	USNO	0,24	3,30	5,29	11,63	14,96
2021	ЗСФ ВНИИФТРИ	0,25	2,77	4,16	10,60	13,86
	USNO	0,24	3,19	5,49	13,20	16,91
2022	ЗСФ ВНИИФТРИ	0,27	3,56	6,29	8,78	13,01
	USNO	0,28	4,07	8,50	16,89	24,90
2023	ЗСФ ВНИИФТРИ	0,26	3,02	6,67	13,71	20,63
	USNO	0,31	3,32	6,39	16,43	27,96

Приведенные в табл. 1–4 оценки СКП прогнозов Всемирного времени и координат полюса, в целом, не показывают устойчивой тенденции к уменьшению, за исключением самых краткосрочных прогнозов. При этом погрешности прогноза Y заметно меньше погрешностей прогноза X , что объясняется более гладким видом функции параметра Y в сравнении с функцией X .

Заключение

Представленный в настоящей статье материал показывает статистику изменений точности прогнозов координат полюса и Всемирного времени ЗСФ ФГУП ВНИИФТРИ и международной (IERS) с 2011 по 2023 гг. включительно. В общей сложности было обработано более 2500 файлов с прогнозами по каждой службе. В качестве меры точности прогнозов использованы средняя квадратическая погрешность (СКП) в форме Гаусса для длин прогнозов 1; 15; 30; 60 и 90 дней.

Анализ полученных результатов вычислений, приведенных в табл. 1–4, показал наличие неравномерности точности прогнозов во всех ПВЗ от года к году, которые возрастают с увеличением дальности прогнозов. Данное колебание точности прогнозов, очевидно, связано с различным по сложности характером изменений ПВЗ от году к году. Близкие результаты по точности краткосрочного

прогноза, вычисляемые в двух сравниваемых службах по разным методикам, указывают на то, что дальнейшее повышение точности при использовании любых статистических методов на интервалы до 10–15 дней практически невозможно. В тоже время, более лучшие среднестатистические результаты среднесрочных (30 дней и более) прогнозов ЗСФ ВНИИФТРИ в сравнении с USNO говорят о еще неиспользованных возможностях достижения более высокой точности прогнозирования на длинные интервалы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2021–2030 годы» в рамках государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России».
2. Earth Orientation Parameters Combination of Prediction Pilot Project. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://maia.usno.navy.mil/eopc/ppp/eopc/ppp.html>.
3. Annual Report 2018. (2020) Dick WR, Thaller D (eds). International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, ISBN 978-3- 86482-136.
4. Petit G, Luzum B (2010) IERS conventions 2010. IERS Technical Note 36. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2010.– 179 p.
5. International Earth Rotation and Reference Systems Service International de la Rotation de la Terre et des Systemes de Reference. [Электронный ресурс]. <https://historic.deltat.datausno.navy.mil/>.
6. Frankfurt am Main, 2003 McCarthy D. D., Petit G. (eds.). IERS Conventions. IERS Technical Note – 2004, No 32. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
7. Горшков В.Л. О методах прогнозирования в геодинимике // Изд. ГАО. – 2005. – №214. – С. 313–335.
8. Kaufman M.N., Pasynok S.L. Russian state time and Earth rotation servise: observation, EOP series, prediction. – Artificial Satellites. – 2010. – Vol. 45. – No 2. – P. 81–86.
9. Гречкосеев А.К., Толстикова А.С., Тиссен В.М., Карманов В.С., Ваганова А.И. Модификация базового метода сингулярного спектрального анализа для повышения точности прогнозирования неравномерности вращения Земли // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 3. 2020.– С. 54–65.
10. Bizouard C., L. Zotov, and N. Sidorenkov, Lunar influence on Equatorial Atmospheric Angular Momentum, Journal of Geophysical Research Atmospheres, DOI:10.1002/2014JD022240 (2014).
11. Филиппова А. С. Численно-аналитическое исследование параметров вращения Земли с приложениями для спутниковой навигации // Диссертация кандидата физико-математических наук. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет): Москва. – 2015. – 121 с.
12. Пасынок С.Л. Оперативное определение параметров вращения Земли в ГМЦ ГСВЧ // Доклады 6-го Международного симпозиума «Метрология времени и пространства», 17–19 сентября 2012 г., Менделеево. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». – 2013. – С. 175–190.
13. Тиссен В. М. Методика высокоточного прогнозирования неравномерностей вращения Земли.// Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. № 2. – 2014.– С. 44–50.
14. Тиссен В. М., Толстикова А. С., Симонова Г. В. «Прогнозирование параметров вращения земли с помощью адаптивных гармонических моделей // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – Т. 25. – № 4. – 2020.– С. 238–245.
15. International Earth Rotation and Reference Systems Service Service International de la Rotation de la Terre et des Systemes de Reference. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://maia.usno.navy.mil/eopc/ppp/eopc/ppp.html>.