

Учет параметров вращения Земли для высокоточного имитационного моделирования движения спутников ГЛОНАСС в интересах гражданских потребителей

© А.Г. Топорков, В.В. Корянов, Ч. Ду

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены параметры вращения Земли при решении задачи высокоточного моделирования движения навигационных космических аппаратов (НКА) ГЛОНАСС. Представлен алгоритм работы программно-алгоритмического комплекса для прогнозирования движения НКА ГЛОНАСС с учетом математических моделей, рекомендованных Международной службой вращения Земли. Показан расчет влияния движения полюса Земли, неравномерности вращения Земли, прецессии и нутации на орбиту НКА ГЛОНАСС в виде ошибок для продольной дальности, вертикали и боковой дальности. Проведена оценка величин возмущающих ускорений и степени их влияния на движение НКА ГЛОНАСС. Получены результаты уходов орбитальных параметров (большой полуоси, эксцентриситета, наклона, долготы восходящего узла, аргумента перигентра и фокального параметра) от номинальных значений в течение 30 суток под действием параметров ориентации Земли.

Ключевые слова: параметры вращения Земли, полюс Земли, ГЛОНАСС, неравномерность вращения Земли, эфемеридно-временное обеспечение

Введение. Определяющим элементом современного координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) является глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС). С постепенным развитием ГЛОНАСС внедрение навигационных технологий в повседневную жизнь гражданских потребителей стало приобретать массовый характер [1].

Цель настоящей статьи состоит в комплексной оценке влияния движения полюса Земли, неравномерности вращения Земли, прецессии и нутации на параметры движения навигационных космических аппаратов типа ГЛОНАСС.

Следует отметить, что одной из наиболее актуальных тенденций совершенствования единой системы КВНО является повышение требований к точности позиционирования центра масс навигационных космических аппаратов (НКА) в целях обеспечения требуемого сантиметрового уровня точности навигационных определений гражданских потребителей [2]. Поэтому для определения местоположения навигационного спутника на уровне сантиметровых и миллиметровых точностей необходимо создание прецизионной математической модели, которая будет учитывать возмущающие воздействия соответствующего уровня точности [3].

В рамках развития КВНО совершенствуются теоретические основы фундаментального координатно-временного обеспечения (ФКВО), одной из важнейших задач которого является определение параметров вращения Земли.

Вращение Земли — это сложный и до конца не изученный процесс, который зависит от многих факторов и локальных процессов внутри, на поверхности и в атмосфере Земли, а также от гравитационных возмущений со стороны Луны, Солнца и других объектов Солнечной системы.

Изучение колебательного процесса географического полюса Земли является важным фундаментальным астрометрическим вопросом, а получаемые результаты имеют значимый не только научный, но и практический интерес.

Необходимо понимать, что существуют два разных понятия:

1) параметры ориентации Земли (ПОЗ, или Earth Orientation Parameters, EOP);

2) параметры вращения Земли (ПВЗ, или Earth Rotation Parameters, ERP).

Для каждого из этих понятий существует свой набор параметров:

ПОЗ

1) x_p — угловая координата смещения оси полюса Земли;

2) y_p — угловая координата смещения оси полюса Земли;

3) $\Delta UT1$ — разность между всемирным астрономическим временем $UT1$ и всемирным координированным временем UTC, таким образом, $\Delta UT1 = UT1 - UTC$;

4) $\Delta\psi$ — поправка к углу прецессии в рамках теории MAC2000;

5) $\Delta\epsilon$ — поправка к углу нутации в рамках теории MAC2000;

ПВЗ

1) x_p — угловая координата смещения оси полюса Земли;

2) y_p — угловая координата смещения оси полюса Земли;

3) $\Delta UT1$.

Определение параметров ПВЗ является одной из важнейших задач, которая решается в рамках комплекса средств фундаментального координатно-временного обеспечения навигационной системы ГЛОНАСС [3, 4]. Без знания ПВЗ невозможно точное взаимное преобразование между небесной и земной системой координат [5] и, соответственно, затруднено высокоточное прогнозирование орбиты космических аппаратов (КА) ГЛОНАСС. Следовательно, нельзя достичь высоких точностей координатно-временного и навигационного обеспечения для наземных, морских, воздушных и космических объектов.

В целях определения ПВЗ специализированные международные научные лаборатории ежедневно проводят обработку большого

количества данных, получаемых с использованием пяти основных методов измерений [6]:

- 1) наблюдения с помощью радиоинтерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ);
- 2) прием сигналов Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS;
- 3) лазерные наблюдения спутников (Satellite Laser Ranging, SLR);
- 4) лазерные наблюдения Луны (Lunar Laser Ranging, LLR);
- 5) доплеровские наблюдения (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, DORIS).

Каждый из методов позволяет определять конкретный набор фундаментальных параметров (табл. 1).

Таблица 1

Возможности различных методов измерений

Измеряемый параметр	Метод измерения				
	РСДБ	GPS/ГЛОНАСС	SLR	LLR	DORIS
x_p, y_p	Да	Да	Да	Да	Да
$\Delta UT1$	Да	Нет	Нет	Да	Нет
$\Delta\psi, \Delta\varepsilon$	Да	Да	Нет	Да	Нет

Приоритетным методом является РСДБ, который служит основой высокоточного решения задач ФКВО. В России направление РСДБ измерений поддерживается и развивается Институтом прикладной астрономии РАН.

Системы отсчета. Разработка и поддержание систем отсчета и координат является сложнейшей проблемой, которая находится на границе многих научных теорий. Все фундаментальные и практические работы в этом направлении ведутся под контролем Международного астрономического союза (International Astronomical Union, IAU) [7], Международного геодезического и геофизического союза (International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG) [8] и Международной ассоциации геодезии (International Association of Geodesy, IAG) [9].

За разработку инерциальных и квазиинерциальных небесных систем отсчета (Celestial Reference System, CRS) несет ответственность IAU, за разработку земных систем отсчета (Terrestrial Reference System, TRS) — IUGG. Общий контроль осуществляется Международной службой вращения Земли и опорных систем отсчета (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS).

Описание используемых актуальных математических моделей для построения опорных систем отсчета, самих систем отсчета, при-

нятые определения, а также необходимые решения союзов IAU и IUGG фиксируются и периодически издаются в «Соглашениях IERS» (IERS Conventions). В данный момент для специалистов актуальным является соглашение, принятое в 2010 г. [10, 11] однако с момента его издания была создана рабочая версия документа, в которую вносятся все обновления и дополнения [12].

В соответствии с последним соглашением IERS Conventions были определены две базовые системы отсчета:

1) международная небесная система отсчета (International Celestial Reference System, ICRS);

2) международная земная система отсчета (International Terrestrial Reference System, ITRS), связанная с вращающейся Землей.

Положение точки в пространстве в ITRS [11] определяется тремя декартовыми прямоугольными координатами X , Y , Z . Ось Z является средней осью вращения Земли и направлена в опорный полюс IERS (IERS Reference Pole, IRP). Ось X лежит в плоскости опорного меридиана IERS (IERS Reference Meridian, IRM). Ось Y дополняет прямоугольную систему до правой системы координат.

Опорный меридиан IRP проходит примерно в 5.3" к востоку (что составляет примерно 102 м) от оси пассажного инструмента Гринвичской обсерватории, которая является точкой отсчета Гринвичского меридиана.

Системы отсчета ICRS и ITRS реализованы в виде следующих опорных систем отсчета:

1) Международная опорная небесная система отсчета (International Celestial Reference Frame, ICRF);

2) Международная опорная земная система отсчета (International Celestial Terrestrial Frame, ITRF).

Для моделирования движения околоземных КА удобно использовать геоцентрическую небесную систему отсчета (Geocentric Celestial Reference System, GCRS), производную от ICRS, начало системы GCRS расположено в геоцентре.

При преобразовании координат из земной в небесную систему отсчета вводится промежуточный полюс (рис. 1, [13]), который называется небесный эфемеридный полюс (Celestial Ephemeris Pole, CEP).

Положение CEP в небесной системе отсчета определяется теорией прецессии и нутации. Координаты CEP в земной системе отсчета представлены координатами полюса x_p и y_p . Угол, на который Земля поворачивается относительно CEP за определенный промежуток атомного времени (Θ_{GAST}), — это гринвичское истинное звездное время (Greenwich Apparent Siderial Time, GAST) [14].

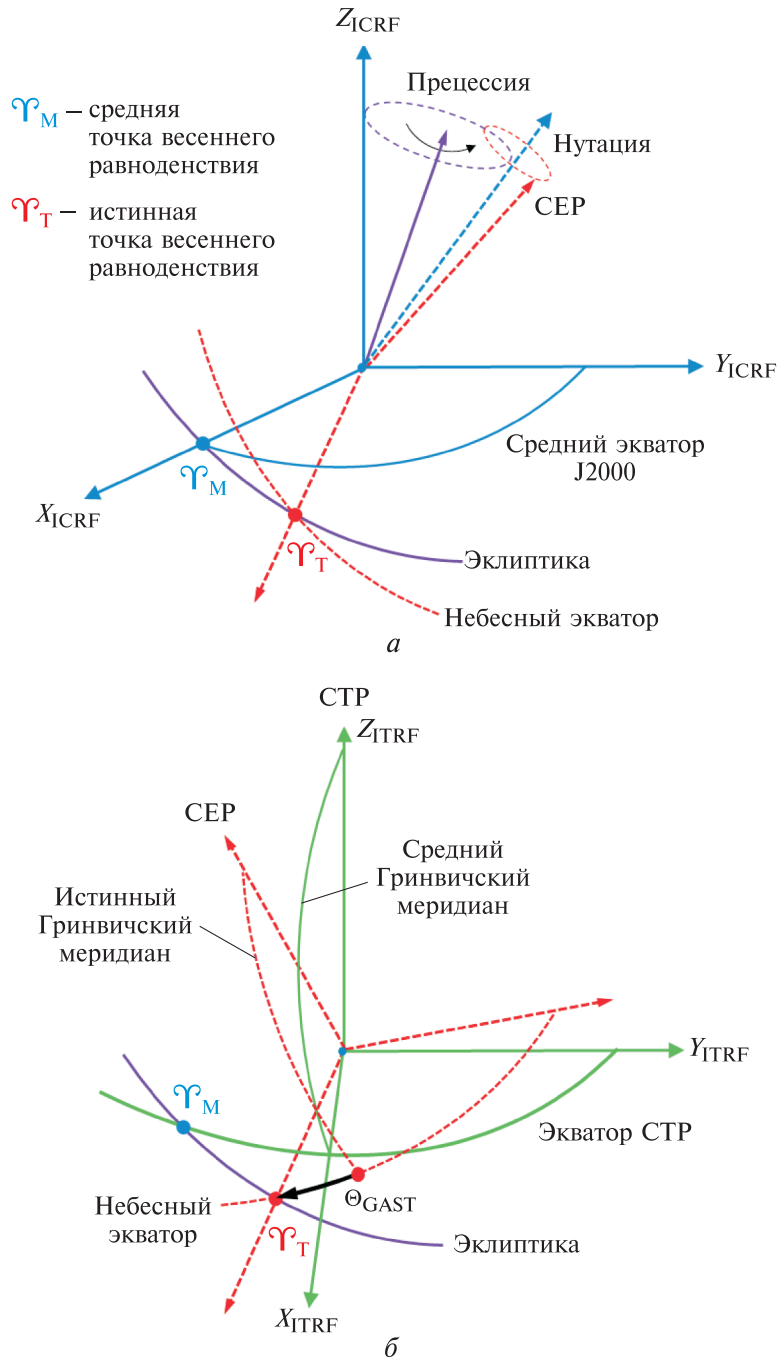


Рис. 1. Определение систем координат:

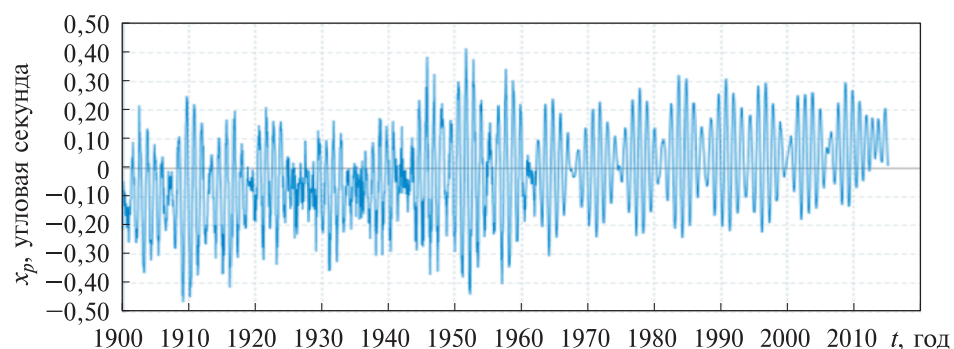
а — небесная ICRF; б — земная ITRF; CTP — условный земной полюс

Движение полюса Земли. Движение полюса Земли это результат перемещения оси вектора мгновенной угловой скорости вращения (мгновенной оси вращения) Земли. Мгновенная ось вращения пере-

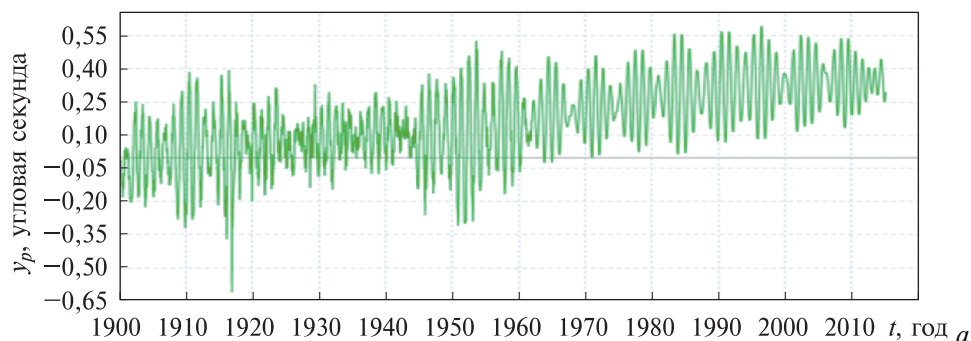
мещается в пространстве в силу воздействия на Землю различных возмущающих факторов, которые имеют разную физическую природу, в частности, за счет действия на Землю гравитационных сил от тел Солнечной системы. При этом наибольший вклад в такое движение вносят Солнце и Луна, которые не лежат в плоскости земного экватора, и их гравитационные силы стремятся развернуть Землю так, чтобы экваториальные вздутия располагались вдоль линии, соединяющей центры масс Земли, Луны и Солнца.

Точка, в которой мгновенная ось вращения Земли пересекает земную поверхность, называется мгновенным полюсом Земли (МПЗ). Положение МПЗ задается прямоугольными координатами x_p и y_p в системе ITRF, связанной с Землей.

Используя данные международной службы IERS [15], можно построить графики в период регулярных наблюдений с 1900 г. На рис. 2 представлена динамика колебания значений x_p и y_p с 1900 г. до середины 2015 г.



а



б

Рис. 2. Графики изменения координат полюса x_p (а) и y_p (б)

Начало координат полюса принято как усредненное положение земного полюса по измерениям за период с 1900 по 1905 г., выполненным Международной службой широты, в состав которой входили

шесть обсерваторий, расположенных на широте $39^{\circ}08'$ [16]. Такое начало координат принято называть Международным условным началом (Conventional International Origin, CIO).

Направления на опорный полюс IRP и опорный меридиан IRM выровнены с соответствующими опорными направлениями ВИН (Bureau International l'Heure) на эпоху 1984.0 в пределах $\pm 0.005''$ [17]. Ориентация оси Z_{ITRS} соответствует полюсу ВИН1984.0 [18]. Полюс ВИН был установлен в 1967 г. и подстроен под CIO, причем погрешность согласования его с CIO составляет не более $\pm 0,03''$ [19].

В связи с увеличением количества станций и повышением точности измерений на станциях IERS было введено новое понятие условного земного полюса (Conventional Terrestrial Pole, CTP). Поэтому сейчас (на текущую календарную дату) CIO можно рассматривать только как частный случай CTP.

Поскольку планета Земля «качается» относительно оси вращения, то движение МПЗ осуществляется по спирали, которая закручивается или раскручивается в течение $\sim 6,5$ года против часовой стрелки. Таково движение Северного полюса, если смотреть на него сверху (рис. 3).

На рис. 3 показана траектория движения (полодия) МПЗ в период с 2001 по 2009 г. и траектория движения среднего полюса Земли в период с 1900 по 2017 г. после обработки данных IERS [13]. На данный момент вековой уход среднего полюса зафиксирован в направлении моря Баффина.

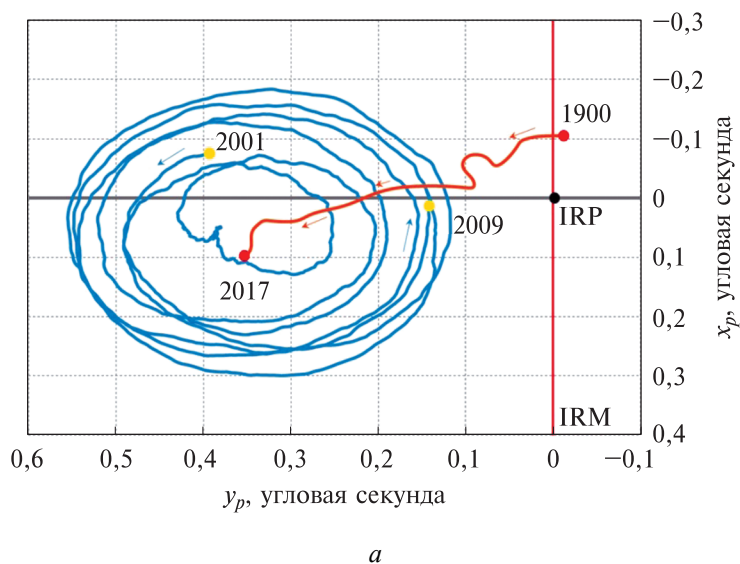


Рис. 3 (начало). Траектория движения полюса ($0,1$ угловой секунды ≈ 3 м в проекции на поверхность Земли):

a — траектория движения МПЗ (—) и среднего полюса

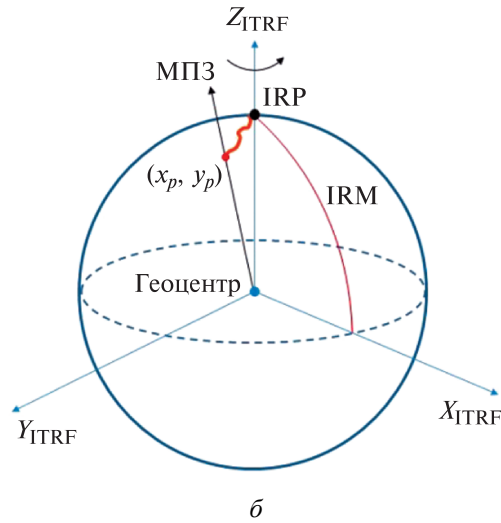


Рис. 3 (окончание). Траектория движения полюса (0,1 угловой секунды ≈ 3 м в проекции на поверхность Земли):

б — траектория движения среднего полюса (—) в системе ITRF

Неравномерность вращения Земли. Номинальное (среднее) значение модуля угловой скорости Земли, рекомендованное международной службой IERS, составляет $\Omega_E = 7,292115 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$; необходимо учитывать, что неопределенность значения этой постоянной находится в диапазоне $10^{-8} \dots 10^{-10} \cdot \Omega_E$ [20]. Неравномерность вращения Земли характеризуется параметром $\Delta UT1$, график изменения $\Delta UT1$ представлен на рис. 4 [13]. Параметр $\Delta UT1$ является трудно прогнозируемым, поэтому в рамках настоящего исследования используются данные службы IERS, полученные в результате регулярных и высокоточных измерений.

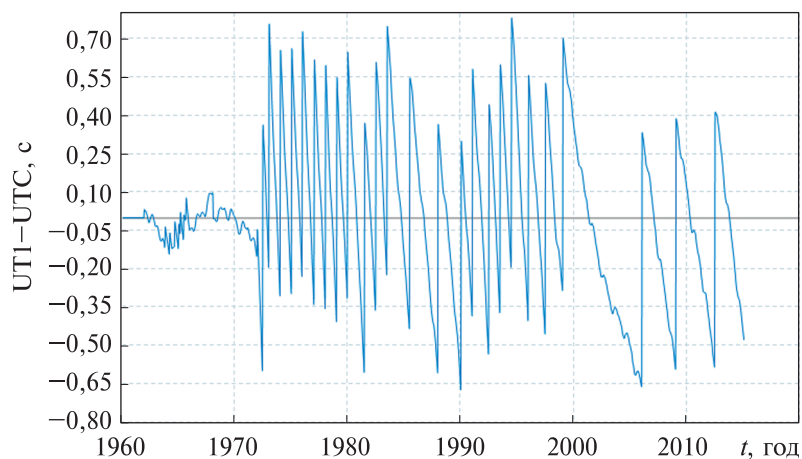


Рис. 4. График изменения $\Delta UT1$ в период с 1960 г. до середины 2015 г. по данным IERS

Программно-алгоритмический комплекс. В рамках разработанного программно-алгоритмического комплекса (ПАК) [21–23] прогноз орбиты спутников ГЛОНАСС осуществляется с использованием утвержденных моделей, констант и параметров ориентации Земли, которые рекомендованы IERS. Алгоритм работы ПАК представлен на рис. 5 и 6.

После запуска программы инициализируется работа базы данных (БД) КА. Поэтому в качестве исходных данных могут быть использованы ранее сохраненные параметры КА. Для точного прогнозирования движения КА ГЛОНАСС используются эфемериды данных аппаратов с официального сайта информационно-аналитического центра КВНО ГЛОНАСС [24, 25].

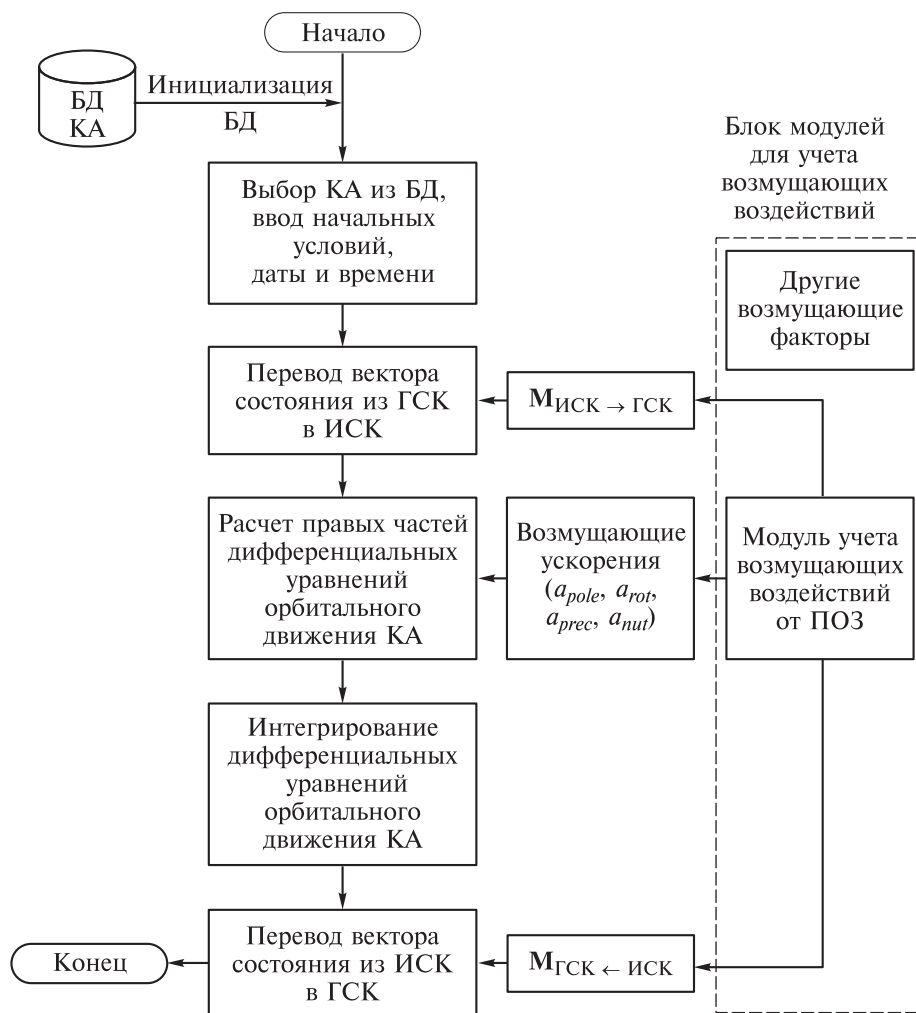


Рис. 5. Блок-схема работы ПАК

На рис. 5 введены следующие обозначения:

a_{pole} — возмущающее ускорение за счет движения полюса Земли;

a_{rot} — возмущающее ускорение за счет неравномерности вращения Земли;

a_{prec} — возмущающее ускорение за счет прецессии Земли;

a_{nut} — возмущающее ускорение за счет нутации Земли;

$\mathbf{M}_{иск \rightarrow ГСК}$ — матрица перехода от гринвичской системы координат (ГСК) к инерциальной системе координат (ИСК);

$\mathbf{M}_{ГСК \leftarrow иск}$ — матрица перехода от ИСК к ГСК;

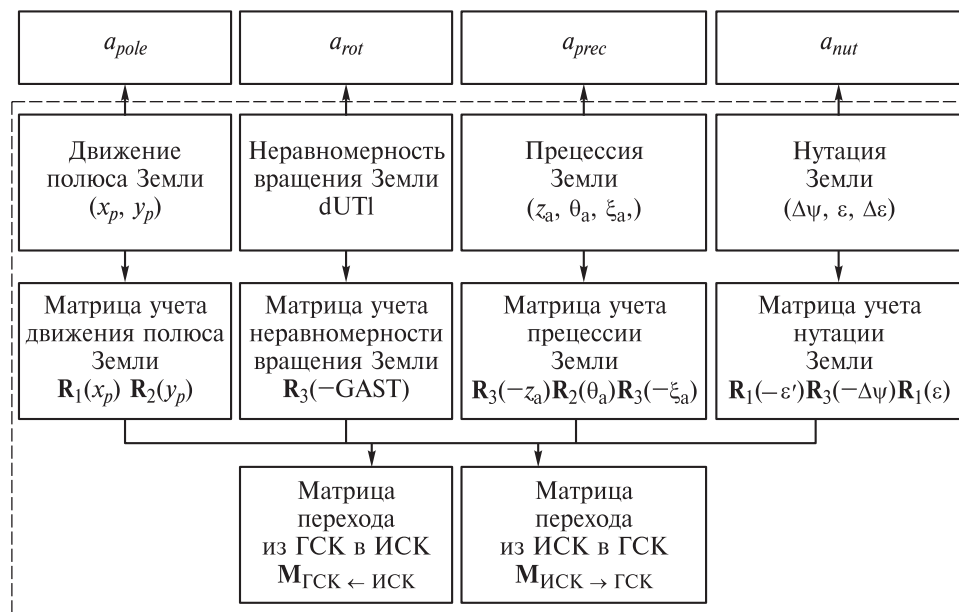


Рис. 6. Алгоритм работы модуля учета возмущающих воздействий в зависимости от ПОЗ

На рис. 6 приведены следующие обозначения:

$\mathbf{R}_1(x_p)$, $\mathbf{R}_2(y_p)$ — поворот относительно оси Y_{ITRF} на угол x_p и поворот относительно оси X_{ITRF} на угол y_p соответственно;

$\mathbf{R}_3(-GAST)$ — поворот относительно оси Z_{ITRF} на угол $GAST$;

z_a , θ_a , ξ_a — прецессионные параметры [11];

$\mathbf{R}_3(-z_a)$, $\mathbf{R}_2(\theta_a)$, $\mathbf{R}_3(-\xi_a)$ — повороты на прецессионные параметры z_a , θ_a , ξ_a соответственно;

$\Delta\psi$, $\Delta\epsilon$ — углы изменения нутации по долготе и в наклоне эклиптики соответственно;

ϵ — средний наклон эклиптики;

$\epsilon' = \epsilon + \Delta\epsilon$ — истинный наклон эклиптики;

$\mathbf{R}_1(-\epsilon')$, $\mathbf{R}_3(-\Delta\psi)$, $\mathbf{R}_1(\epsilon)$ — повороты на углы ϵ' , $\Delta\psi$ и ϵ соответственно.

Результаты моделирования. Как показало исследование, изложенное в настоящей статье, влияние, оказываемое движением h полюса Земли на движение КА ГЛОНАСС, зависит от даты начала моделирования. На рис. 7 представлены графики с ошибками прогноза для дат 25.11.2018 г. и 01.02.2019 г. Графики ошибок рассчитаны для продольной дальности (ΔX), для вертикали (ΔY) и боковой дальности (ΔZ).

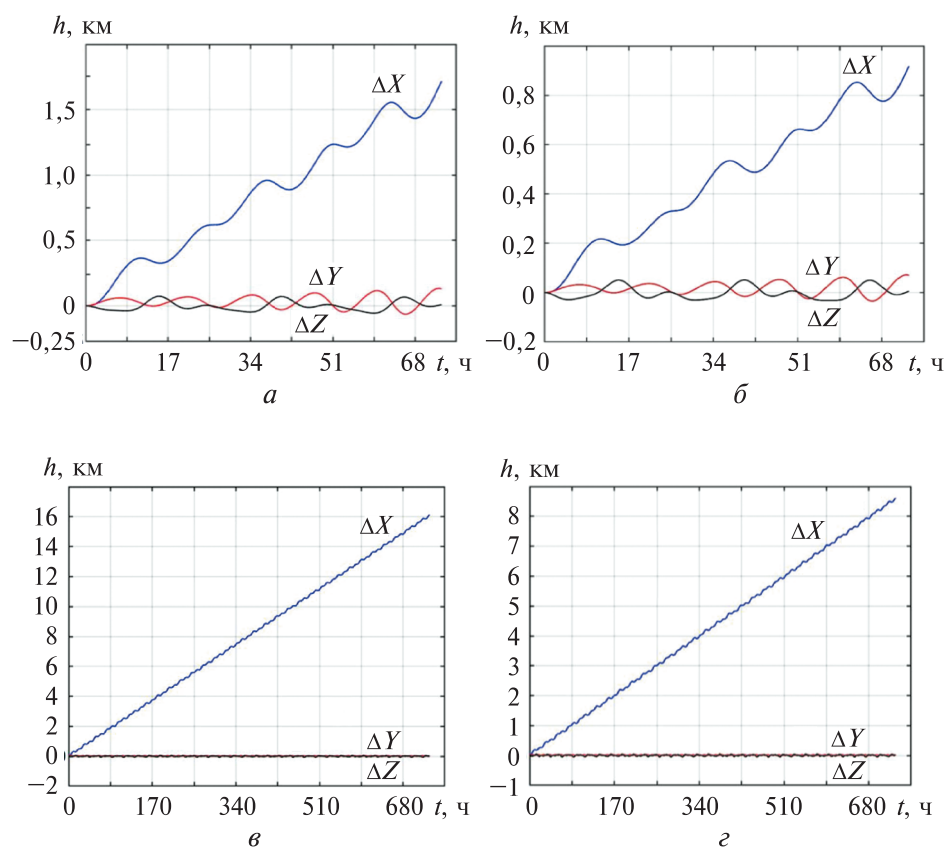


Рис. 7. Влияние движения полюса Земли на движение КА ГЛОНАСС для даты моделирования 25.11.2018 г. (а, в), 01.02.2019 (б, г) с интервалами 3 сут (а, б) и 30 сут (в, г)

При анализе полученных результатов (см. рис. 7) становится понятным, что для продольной дальности наблюдается вековой уход.

Из графиков на рис. 8 и 9 видно, что ΔY практически не меняется и значение лежит в диапазоне ± 1 м; ΔZ имеет гармонический вид, а амплитуда быстро возрастает. При этом ΔY и ΔZ не имеют вековых уходов, в то время как ΔX имеет значительный вековой тренд и за 1 месяц отклонение достигает ~ 1170 м.

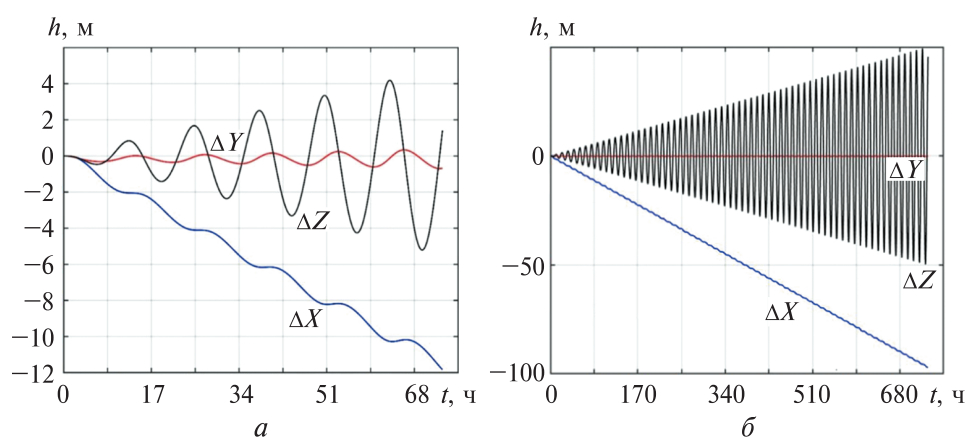


Рис. 8. Влияние неравномерности вращения Земли на движение КА ГЛОНАСС (для даты начала моделирования 01.02.2019 г.) с интервалами 3 сут (а) и 30 сут (б)

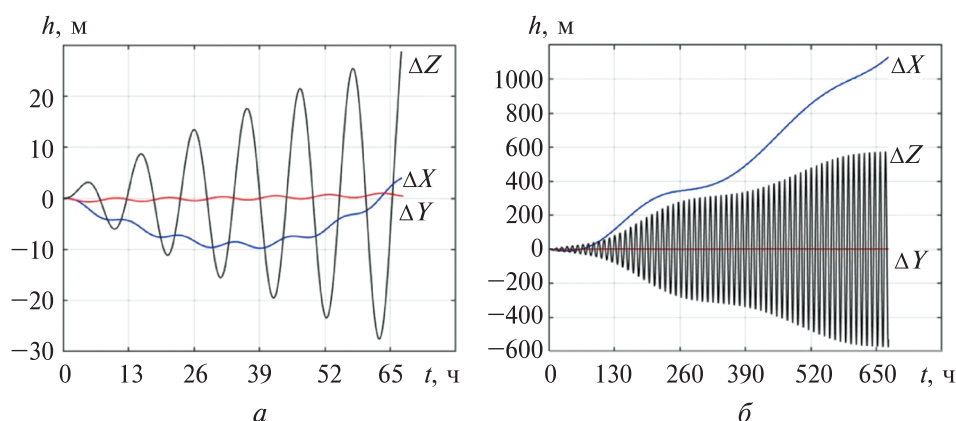


Рис. 9. Комплексное влияние прецессии и нутации оси вращения Земли на движение КА ГЛОНАСС (для даты начала моделирования 01.02.2019 г.) с интервалами 3 сут (а) и 30 сут (б)

Анализируя полученные результаты (см. рис. 7–9), можно оценить величину возмущающих ускорений и степень их влияния на орбиту КА ГЛОНАСС. В табл. 2 представлены для сравнения возмущающие ускорения, обусловленные ПОЗ и вызванные другими факторами, при этом значения всех возмущающих факторов получены с помощью разработанного программного комплекса (см. рис. 5).

Как видно по данным, приведенным в табл. 2, порядок возмущения от движения полюса Земли соизмерим с гравитационным влиянием Луны и Солнца, а неравномерность вращения Земли оказывает возмущение на два порядка выше, чем гармоники разложения от 8×8 до 12×12 .

Возмущающие ускорения, вызванные разными факторами

Возмущающий фактор	Величина возмущающего ускорения, м/с^2
Центральное поле Земли	$5,972 \cdot 10^{-1}$
Сжатие Земли (гармоника 2×0)	$5,415 \cdot 10^{-5}$
Гравитационное влияние Луны	$4,104 \cdot 10^{-6}$
Движение полюса Земли	$3,213 \cdot 10^{-6}$
Гравитационное влияние Солнца	$1,063 \cdot 10^{-6}$
Сжатие Земли (гармоники порядка 8×8)	$5,334 \cdot 10^{-7}$
Сжатие Земли (гармоники порядка 10×10)	$4,053 \cdot 10^{-7}$
Световое давление от Солнца	$1,087 \cdot 10^{-7}$
Прецессия и нутация оси вращения Земли	$2,512 \cdot 10^{-8}$
Неравномерность вращения Земли	$3,317 \cdot 10^{-9}$
Сжатие Земли (гармоники порядка 12×12)	$2,586 \cdot 10^{-11}$

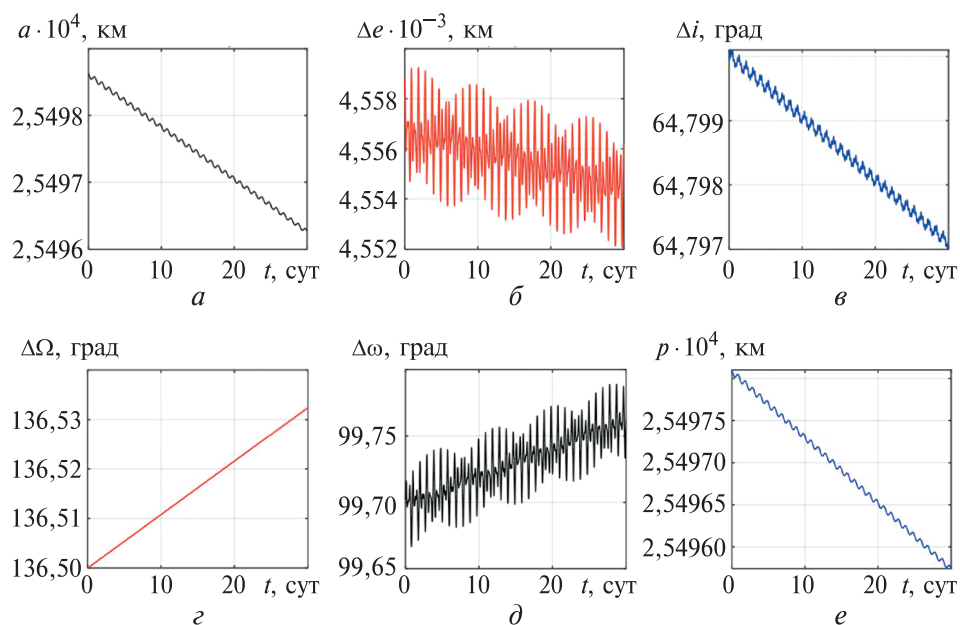


Рис. 10. Влияние движения полюса Земли на кеплеровы элементы орбиты:

a — большая полуось; b — эксцентриситет; φ — наклонение; φ — долгота восходящего узла;
 φ — аргумент перигеллия; e — фокальный параметр

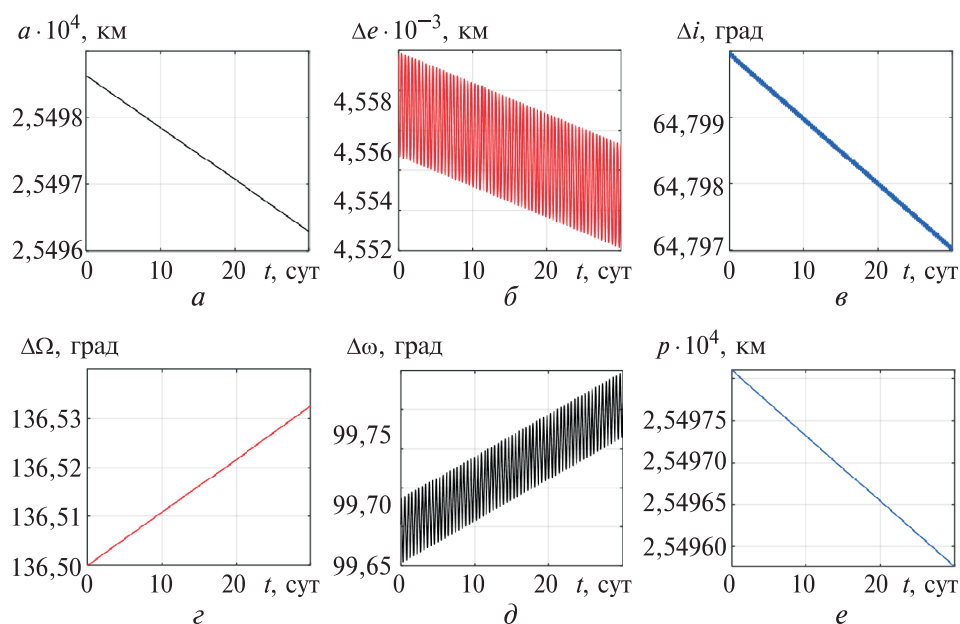


Рис. 11. Влияние неравномерности вращения Земли на кеплеровы элементы орбиты:

a — большая полуось; b — эксцентриситет; i — наклонение; z — долгота восходящего узла; d — аргумент перигея; e — фокальный параметр

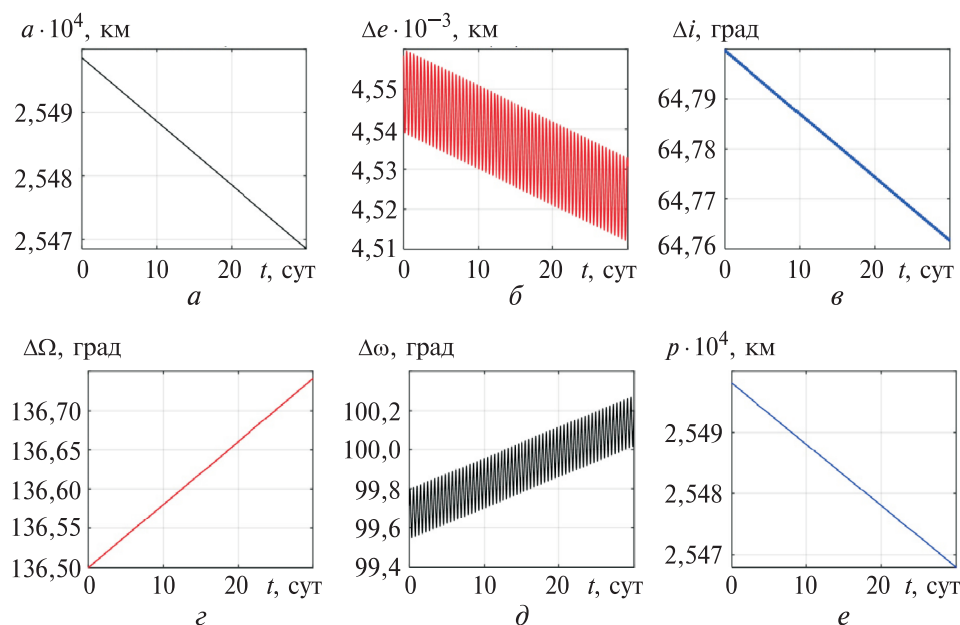


Рис. 12. Влияние прецессии и нутации Земли на кеплеровы элементы орбиты:

a — большая полуось; b — эксцентриситет; i — наклонение; z — долгота восходящего узла; d — аргумент перигея; e — фокальный параметр

На рис. 10–12 представлены графики уходов орбитальных параметров с интервалом движения 30 сут:

- большая полуось Δa ;
- эксцентриситет Δe ;
- наклонение Δi ;
- долгота восходящего узла $\Delta \Omega$;
- аргумент перицентра $\Delta \omega$;
- фокальный параметр p .

Анализируя полученные результаты, представленные на рис. 10–12, можно сформировать таблицу с максимальными отклонениями (табл. 3).

Таблица 3

Возмущения орбитальных параметров ГЛОНАСС

Начальные значения орбитальных параметров: $a_0 = 25498,66$ км; $e_0 = 0,00456$; $i_0 = 64,8$ град; $\Omega_0 = 136,5$ град; $\omega_0 = 99,7$ град					
Возмущающий фактор	$ \Delta a $, км	$ \Delta e $	$ \Delta i $, град	$ \Delta \Omega $, град	$ \Delta \omega $, град
Движение полюса Земли	2,481	$5 \cdot 10^{-6}$	0,003	0,032	0,064
Неравномерность вращения Земли	2,462	$4 \cdot 10^{-6}$	0,003	0,033	0,065
Прецессия и нутация	30,181	$3 \cdot 10^{-5}$	2,968	0,244	0,518

Согласно данным табл. 3, значения, полученные в результате воздействия движения полюса Земли и неравномерности вращения Земли, одного порядка для заданного орбитального параметра. Влияние прецессии и нутации является более существенным.

Закключение. Движение полюса Земли, неравномерность вращения Земли, прецессия и нутация создают вековые уходы, но только для продольной дальности ΔX . Полученные результаты позволяют провести ранжирование возмущающих ускорений, обусловленных ПОЗ, по степени их влияния на орбиту КА ГЛОНАСС. Движение полюса Земли оказывает наибольшее влияние на возмущающее ускорение среди остальных параметров ориентации Земли.

Согласно изменениям кеплеровых элементов, тенденция векового ухода присутствует у большой полуоси, эксцентриситета, наклона, долготы восходящего узла, аргумента перицентра и фокального параметра. При этом в инерциальном пространстве прецессия и нутация сильнее других возмущающих факторов среди ПОЗ оказывают влияние на кеплеровы элементы.

Рассмотренные изменения параметров орбиты позволяют определять значения суммарной характеристической скорости и количе-

ство импульсов для компенсации деградации этих параметров с целью поддержания орбиты КА ГЛОНАСС в требуемых диапазонах.

Пренебрегать параметрами ориентации Земли не рекомендуется, если разрабатывается математическая модель орбитального движения КА ГЛОНАСС, реализуемая на борту. Поэтому такие параметры обязательно учитываются при обработке высокоточных траекторных измерений спутников ГЛОНАСС.

Достоверность полученных данных подтверждается совпадением отдельных результатов расчетов с информацией, приведенной в [26] и [27].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лысенко Л.Н., Корянов В.В., Топорков А.Г. Об оценке требований к точности спутниковой навигации на основе анализа современного состояния КВНО потребительских систем гражданского назначения. *Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение*, 2015, № 5, с. 47–61.
- [2] Топорков А.Г. Анализ влияния возмущений от Луны, Солнца и планет Солнечной системы на движение космического аппарата ГЛОНАСС. *XLII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения». Сборник тезисов докладов. В 4 т. Т. 1.* Москва, Изд-во МАИ, 2016, с. 193–194.
- [3] Ипатов А.В., Варганов М.Е. *Радио-интерферометрический комплекс «Квазар-КВО» как основа координатно-временного обеспечения и фундаментальной поддержки системы ГЛОНАСС.* URL: http://mwelectronics.ru/2012/Plenary/U06_A.V.%20Ipatov_Radiointerferometricheskiy%20kompleks%20Kvazar-KVO.pdf (дата обращения 10.06.2020).
- [4] Ивашина А.В., Топорков И.С., Глуздов А.Н., Кулешов Ю.В., Сахно И.В., Косынкин А.И., Козлов А.В. *Требования Минобороны России к фундаментальному сегменту ГНСС ГЛОНАСС на период до 2030 г. Труды Института прикладной астрономии РАН.* Санкт-Петербург, Изд-во ИПА РАН, 2019, № 51, с. 63–72.
- [5] Чинилина М.А., Пасынок С.Л. *Переход от небесной системы координат к земной системе координат и обратно.* URL: http://pvz.vniiftri.ru/theory/OTD73_IERS_v1.pdf (дата обращения 10.06.2020).
- [6] Пасынок С.Л. *Методы и средства определения параметров вращения Земли. Альманах современной метрологии.* URL: http://pvz.vniiftri.ru/theory/StatyaSchool_v3.pdf (дата обращения 10.06.2020).
- [7] *The International Astronomical Union.* URL: <https://www.iau.org/> (дата обращения 10.06.2020).
- [8] *The International Union of Geodesy and Geophysics.* URL: <http://www.iugg.org/> (дата обращения 10.06.2020).
- [9] *The International Association of Geodesy.* URL: <http://www.iag-aig.org/> (дата обращения 10.06.2020).
- [10] *IERS Conventions (2010). International Earth Rotation and Reference Systems Service.* URL: <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/>

- tn36.html;jsessionid=B63A1239D05DFF82EED55F3E7105C164.live2 (дата обращения 10.06.2020).
- [11] Petit G., Luzum B., eds. *IERS Conventions (2010). International Earth Rotation and Reference Systems Service Technical Note No. 36*. Frankfurt, Germany, 2010, 180 p.
URL: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (дата обращения 10.06.2020).
- [12] *IERS Conventions Centre. IERS Conventions (2010) Packaged Content*.
URL: https://iers-conventions.obspm.fr/conventions_versions.php#updated_target (дата обращения 10.06.2020).
- [13] Subirana J. Sanz, Zornoza J.M. Juan, Hernandez-Pajares M. *GNSS Data Processing. Volume I: Fundamentals and Algorithms*. ESA Communication Publ., 2013, 238 p.
- [14] Жаров В.Е. *Сферическая Астрономия*. Фрязино, Изд-во Век 2, 2006, 480 с.
- [15] *International Earth Rotation and Reference Systems Service. Earth orientation center*. URL: <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php> (дата обращения 10.06.2020).
- [16] Куликов К.А., Сидоренков Н.С. *Планета Земля*. Москва, Наука, 1977, 192 с.
- [17] Сидоренков Н.С. *Физика неустойчивостей вращения Земли*. Москва, Физматлит, 2002, 384 с.
- [18] Groten E. *The motion of the Earth*. Landolt-Börnstein — Group V Geophysics, 1984, vol. 2A, pp. 9–46.
- [19] McCarthy D.D. *IERS Technical Note 21 — IERS Conventions (1992)*. Central Bureau of IERS — Observatoire de Paris, 1996, 96 p.
URL: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote21/tn21.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (дата обращения 10.06.2020).
- [20] Фатеев В.Ф. *Релятивистская метрология околоземного пространства-времени*. Менделеево, ФГУП ВНИИФТРИ, 2017, 439 с.
- [21] Топорков А.Г., Корянов В.В. Влияние параметров вращения Земли на прогнозирование эфемерид навигационных космических аппаратов. *Тезисы докладов научно-технической конференции «Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение»*. Менделеево, ФГУП ВНИИФТРИ, 2017, с. 137–138.
- [22] Топорков А.Г., Корянов В.В. Прогнозирование эфемерид навигационных космических аппаратов на основе учета параметров вращения Земли. *Материалы LI Научных чтений памяти К.Э. Циолковского*. Калуга, Изд-во «Эйдос», 2016, с. 153–154.
- [23] Лысенко Л.Н., Корянов В.В., Топорков А.Г. Концепция разработки программно-методического обеспечения комплекса имитационного моделирования условий функционирования орбитального сегмента глобальных навигационных и телекоммуникационных геостационарных спутниковых систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2015-5-1398>
- [24] *Альманахи ГЛОНАСС и GPS. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения*.
URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/ALMANAC/> (дата обращения 10.06.2020).
- [25] *Высокоточная эфемеридно-временная информация для ГЛОНАСС и GPS. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения*. URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/> (дата обращения 10.06.2020).

- [26] Марков Ю.Г., Михайлов М.В., Почукаев В.Н. Учет фундаментальных составляющих параметров вращения Земли в формировании высокоточной орбиты навигационных спутников. *Доклады академии наук*, 2012, т. 445, № 1, с. 37–41.
- [27] Марков Ю.Г., Михайлов М.В., Почукаев В.Н. Высокоточный прогноз орбит космического аппарата как результат рационального выбора возмущающих факторов. *Доклады академии наук*, 2014, т. 457, № 2, с. 170–174.

Статья поступила в редакцию 11.08.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Топорков А.Г., Корянов В.В., Ду Ч. Учет параметров вращения Земли для высокоточного имитационного моделирования движения спутников ГЛОНАСС в интересах гражданских потребителей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-10-2025>

Топорков Алексей Геннадьевич — старший преподаватель кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: agtoporkov@bmstu.ru

Корянов Всеволод Владимирович — канд. техн. наук, доцент, первый заместитель заведующего кафедрой «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: vkoryanov@bmstu.ru

Ду Чунжуй — выпускник 2019 г. кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» факультета «Международные образовательные программы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: ducru1@yandex.ru

Parameters of the Earth's rotation taken into account in high-precision simulation of the GLONASS satellites motion in the interests of civil consumers

© A.G. Toporkov, V.V. Koryanov, Chunzhuy Du

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The purpose of the study was to consider the parameters of the Earth's rotation in solving the problem of high-precision simulation of the GLONASS navigation spacecraft motion. The paper introduces an algorithm for the operation of a program-algorithm complex for predicting the motion of the GLONASS satellite, taking into account the mathematical models recommended by the International Earth Rotation Service. The study presents the results of estimating the influence of the Earth's pole motion, uneven rotation of the Earth, precession and nutation on the GLONASS satellite orbit in the form of errors for longitudinal range, vertical and lateral range. The values of the disturbing accelerations and the degree of their influence on the motion of the GLONASS satellite were estimated. The results of deviations of the orbital parameters are obtained: semi-major axis, eccentricity, inclination, longitude of the ascending node, the argument of the pericenter and the focal parameter at an interval of 30 days under the influence of the parameters of the Earth's orientation.

Keywords: *parameters of the Earth's rotation, the Earth's pole, GLONASS, irregularity of the Earth's rotation, ephemeris-time support, Earth Rotation Parameters*

REFERENCES

- [1] Lysenko L.N., Korianov V.V., Toporkov A.G. *Vestnik MGTU. Seriya Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2015, no. 5, pp. 47–61.
- [2] Toporkov A.G. Analiz vliyaniya vozmuscheniy ot Luny, Solntsa i planet Solnechnoy sistemy na dvizhenie kosmicheskogo apparata GLONASS [Analysis of the influence of disturbances from the Moon, the Sun and planets of the solar system on the motion of the GLONASS spacecraft]. *XLII Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya "Gagarinskie chteniya": Sbornik tezisev dokladov* [XLII International Youth Scientific Conference "Gagarin Readings": Collection of abstracts]. In 4 vols, vol. 1. Moscow, MAI Publ., 2016, pp. 193–194.
- [3] Ipatov A.V., Varganov M.E. *Radio-interferometricheskii kompleks «Kvazar-KVO» kak osnova koordinatno-vremennogo obespecheniya i fundamentalnoy podderzhki sistemy GLONASS* [Radio-interferometric complex "Kvazar-KVO" as the basis of coordinate-time support and fundamental support of the GLONASS system]. Available at: http://mwelectronics.ru/2012/Plenary/U06_A.V.%20Ipatov_Radiointerferometricheskii%20kompleks%20Kvazar-KVO.pdf (accessed June 10, 2020).
- [4] Ivashina A.V., Toporkov I.S., Gluzdov A.N., Kuleshov Yu.V., Sakhno I.V., Kotsynkin A.I., Kozlov A.V. Trebovaniya Minoborony Rossii k fundamentalnomu segmentu GNSS GLONASS na period do 2030 g. [Requirements of the Russian Ministry of Defense for the GLONASS GNSS fundamental segment for the period until 2030]. *Trudy Instituta prikladnoy astronomii RAN* [Proceedings of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences]. St. Petersburg, IAA RAS Publ., 2019, no. 51, pp. 63–72.

- [5] Chinilina M.A., Pasynok S.L. *Perekhod ot nebesnoy sistemy koordinat k zemnoy sisteme koordinat i obratno* [Transition from the celestial coordinate system to the terrestrial coordinate system and vice versa]. Available at: http://pvz.vniiftri.ru/theory/OTD73_IERS_v1.pdf (accessed June 10, 2020).
- [6] Pasynok S.L. *Metody i sredstva opredeleniya parametrov vrashcheniya Zemli. Almanakh sovremennoy metrologii* [Methods and tools for determining the parameters of the Earth's rotation. Almanac of modern metrology]. Available at: http://pvz.vniiftri.ru/theory/StatyaSchool_v3.pdf (accessed June 10, 2020).
- [7] *The International Astronomical Union*. Available at: <https://www.iau.org/> (accessed June 10, 2020).
- [8] *The International Union of Geodesy and Geophysics*. Available at: <http://www.iugg.org/> (accessed June 10, 2020).
- [9] *The International Association of Geodesy*. Available at: <http://www.iag-aig.org/> (accessed June 10, 2020).
- [10] *IERS Conventions (2010). International Earth Rotation and Reference Systems Service*. Available at: <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html;jsessionid=B63A1239D05DFF82EED55F3E7105C164.live2> (accessed June 10, 2020).
- [11] Petit G., Luzum B., eds. *IERS Conventions (2010). International Earth Rotation and Reference Systems Service Technical Note No. 36*. Frankfurt, Germany, 2010, 180 p. Available at: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (accessed June 10, 2020).
- [12] *IERS Conventions Centre. IERS Conventions (2010) Packaged Content*. Available at: https://iers-conventions.obspm.fr/conventions_versions.php#updated_target (accessed June 10, 2020).
- [13] Subirana J. Sanz, Zornoza J.M.J., Hernandez-Pajares M. *GNSS Data Processing. Vol. I: Fundamentals and Algorithms*. ESA Communication Publ., 2013, 238 p.
- [14] Zharov V.E. *Sfericheskaya Astronomiya* [Spherical Astronomy]. Fryazino, Vek 2 Publ., 2006, 480 p.
- [15] *International Earth Rotation and Reference Systems Service. Earth orientation center*. Available at: <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php> (accessed June 10, 2020).
- [16] Kulikov K.A., Sidorenkov N.S. *Planeta Zemlya* [The Earth]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 192 p.
- [17] Sidorenkov N.S. *Fizika nestabilnostey vrashcheniya Zemli* [Physics of instabilities of the Earth's rotation.]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002, 384 p.
- [18] Groten E. *The motion of the Earth*. Landolt-Börnstein — Group V Geophysics, 1984, vol. 2A, pp. 9–46.
- [19] McCarthy D.D. *IERS Technical Note 21 — IERS Conventions (1992)*. Central Bureau of IERS — Observatoire de Paris, 1996, 96 p. Available at: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote21/tn21.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (accessed June 10, 2020).
- [20] Fateev V.F. *Relyativistskaya metrologiya okolozemnogo prostranstva-vremeni* [Relativistic metrology of near-earth space-time]. Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2017, 439 p.
- [21] Toporkov A.G., Koryanov V.V. *Vliyanie parametrov vrashcheniya Zemli na prognozirovaniye efemerid navigatsionnykh kosmicheskikh apparatov* [The influence of the parameters of the Earth's rotation on the forecasting of the ephemeris of navigation spacecraft.]. *Tezisy dokladov nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Navigatsiya po gravitatsionnomu polyu Zemli i ee metrologicheskoe obespe-*

- chenie» [Abstracts of the scientific and technical conference “Navigation in the Earth's gravitational field and its metrological support”]. Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2017, pp. 137–138.
- [22] Toporkov A.G., Koryanov V.V. Prognozirovaniye efemerid navigatsionnykh kosmicheskikh apparatov na osnove ucheta parametrov vrashcheniya Zemli [Prediction of the ephemeris of navigation spacecraft based on the parameters of the Earth's rotation]. *Materialy LI Nauchnykh chteniy pamyati K.E. Tsiolkovskogo* [Proceedings of LI Scientific readings in memory of K.E. Tsiolkovsky]. Kaluga, Eydos Publ., 2016, pp. 153–154.
- [23] Lysenko L.N., Koryanov V.V., Toporkov A.G. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, iss. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2015-5-1398>
- [24] *Almanakhi GLONASS i GPS. Informatsionno-analiticheskiy tsentr koordinatno-vremennogo i navigatsionnogo obespecheniya* [GLONASS and GPS Almanacs. Information and Analytical Center for Coordinate Time and Navigation Support]. Available at: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/ALMANAC/> (accessed June 10, 2020).
- [25] *Vysokotochnaya efemeridno-vremennaya informatsiya dlya GLONASS i GPS. Informatsionno-analiticheskiy tsentr koordinatno-vremennogo i navigatsionnogo obespecheniya* [High-precision ephemeris time information for GLONASS and GPS. Information and Analytical Center for Coordinate Time and Navigation Support]. Available at: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/> (accessed June 10, 2020).
- [26] Markov Yu.G., Mikhaylov M.V., Pochukaev V.N. *Doklady akademii nauk (Proceedings of the Academy of Sciences)*, 2012, vol. 445, no. 1, pp. 37–41.
- [27] Markov Yu.G., Mikhaylov M.V., Pochukaev V.N. *Doklady akademii nauk (Proceedings of the Academy of Sciences)*, 2014, vol. 457, no. 2, pp. 170–174.

Toporkov A.G., Assist. Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: agtoporkov@bmstu.ru

Koryanov V.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, First Deputy Head of the Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: vkoryanov@bmstu.ru

Du Chunzhuy graduated from the Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University in 2019.
e-mail: ducruui@yandex.ru