

## **Об интервалах обновления данных о положениях Луны, Солнца и планет для эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС**

**© М. В. Васильев, Э. И. Ягудина**

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Для эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС необходимо наличие доступа к данным о положениях тел, возмущающих орбиты навигационных спутников — Луны, Солнца и планет. Современные эфемериды Луны, Солнца и планет представлены теориями DE/LE(США), INPOP(Франция) и EPM(Россия). Все они обладают необходимой точностью для решения задачи прогноза эфемерид навигационных ИСЗ, включая спутники системы ГЛОНАСС, и представлены в виде файлов с коэффициентами чебышевских аппроксимирующих полиномов для координат и скоростей планет, Солнца и Луны. Однако, каждая из реализаций этих эфемерид получена на основе фиксированного набора наблюдательных данных и теряет в точности представления координат возмущающих тел вне интервала использованных наблюдений. В работе анализируется скорость ухудшения точности данных о положениях Луны, Солнца и планет для различных версий теории DE/LE и даны рекомендации по выбору интервалов обновления этих данных для эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС и при их использовании для автономного прогноза эфемерид навигационных спутников в аппаратуре потребителя.

**Ключевые слова:** эфемериды Луны, Солнца, планет, эфемеридное обеспечение системы ГЛОНАСС, эфемериды навигационных спутников, навигационная аппаратура потребителей.

### **Введение**

Для эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС используются данные о положениях тел, возмущающих орбиты навигационных спутников — Луны, Солнца и планет. Эти данные могут быть получены путем использования современных высокоточных численных эфеме-

рид Луны, Солнца и планет DE/LE (США) [1], INPOP (Франция) [2] и EPM (Россия) [3, 4]. Все перечисленные эфемериды обладают сопоставимой точностью, которая достаточна для решения задачи прогноза эфемерид навигационных ИСЗ [5, 6], включая спутники системы ГЛОНАСС. Каждая из реализаций этих эфемерид получена на основе фиксированного набора наблюдательных данных и теряет в точности представления координат возмущающих тел вне интервала использованных наблюдений. Для сопровождения системы ГЛОНАСС и ее приложений более всего подходят российские эфемериды EPM, которые лицензионно чисты для российских потребителей и используют такие же модели и базы наблюдательных данных, как и эфемериды серии DE. Изменения точности данных о положениях Луны, Солнца и планет в зависимости от различных параметров будут анализироваться на примере различных версий теории DE, поскольку она имеет наиболее длинную историю из перечисленных выше современных эфемерид.

### **Точность эфемерид на интервале наблюдений**

Анализ точности данных о положениях Луны, Солнца и планет выполнен путем сравнения эфемерид DE405, DE421 и DE430 с помощью системы ЭРА [7]. Интервалы наблюдений, использованных при построении этих эфемерид, заканчивались в 1998, 2007 и 2014 годах, соответственно. Поскольку теоретические модели и наборы наблюдательных данных, лежащие в основе всех современных эфемерид, практически идентичны, точностные характеристики данных о положениях Луны, Солнца и планет рассматривались только на примере эфемерид серии DE. Все полученные выводы будут справедливы также и для эфемерид INPOP (Франция) и EPM (Россия). На рис. 1 представлены разности геоцентрических координат Луны, Солнца и Юпитера для эфемерид DE405 и DE421 (серый цвет, 1990–1998 гг.), DE405 и DE430 (серый цвет, 1990–1998 гг.), DE421 и DE 430 (черный цвет, 1990–2007 гг.).

Разности геоцентрических координат DE405 и DE421, DE405 и DE430 отмечены одинаковым цветом поскольку в таком масштабе они неразличимы. Из представленных выше графиков видно значительное улучшение точностных характеристик эфемеридных данных, достигнутое в последнее десятилетие и связанное с использованием современных светолокационных наблюдений Луны (Серга, Апаче) и наблюдений космических аппаратов (Mars Express, Venus Express, Mars Reconnaissance Orbiter, MESSENGER, Ulysses и т. д.).

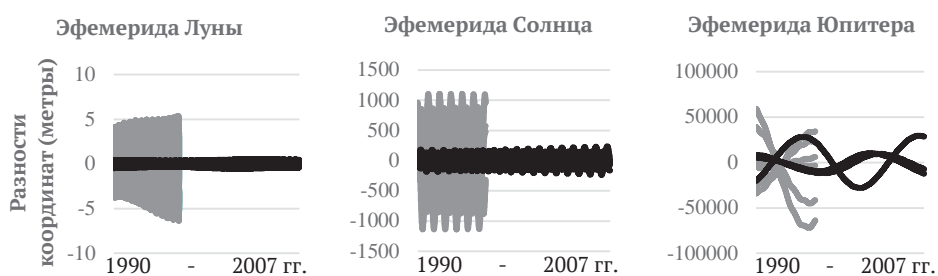


Рис. 1. Разности геоцентрических координат Луны, Солнца и Юпитера на интервалах наблюдений для эфемерид серии DE

### Точность прогноза эфемерид

Использование эфемерид Луны, Солнца и планет для сопровождения системы ГЛОНАСС предполагает выполнение следующих условий: компактность эфемерид, точность прогноза эфемерид на большие интервалы времени и их лицензионная чистота. Рассмотрим оценки скорости ухудшения точности данных о положениях Луны, Солнца и планет для различных версий эфемерид DE/LE вне интервала использованных для их построения наблюдений. На рис. 2 представлены разности геоцентрических координат Луны, Солнца и Юпитера для эфемерид DE405 и DE421 (серый цвет, 1998–2050 гг.), DE405 и DE430 (серый цвет, 1998–2050 гг.), DE421 и DE430 (черный цвет, 2007–2050 гг.).

Таким образом, эфемерида DE405 демонстрирует заметное, но не критичное для задач сопровождения системы ГЛОНАСС падение точности вплоть до 2050 года и далее. Эфемериды DE421 и DE430 представляют серьезно улучшенные по сравнению с DE405 точностные характеристики, которые практически не будут меняться в ближайшие 20–30 лет.

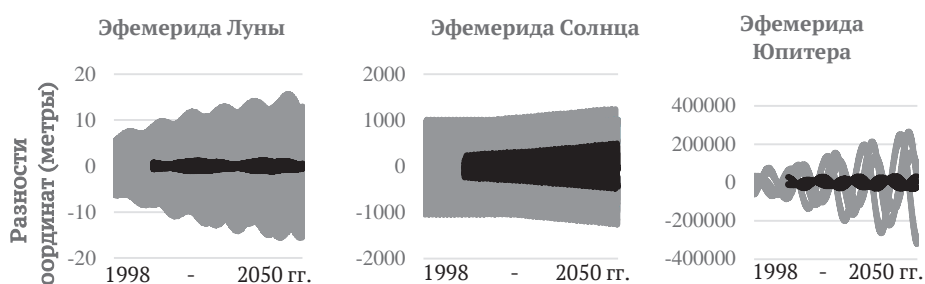


Рис. 2. Разности геоцентрических координат Луны, Солнца и Юпитера вне интервалов наблюдений для эфемерид серии DE

### Точность и компактность представления эфемерид

Эфемериды серии DE и их аналоги представлены в виде файлов с коэффициентами чебышевских аппроксимирующих полиномов для координат и скоростей планет, Солнца и Луны. Объем данных для вычисления геоцентрических координат Луны и Солнца составляет примерно 450 килобайт на десятилетнем интервале аппроксимации. Параметры чебышевских аппроксимирующих полиномов выбраны таким образом, чтобы обеспечить точность представления координат, необходимую для обработки современных и перспективных высокоточных наблюдений. Разница значений полиномов на смежных концах подинтервалов аппроксимации в миллиметрах для разных объектов приведена на рис. 3 и дает представление о формальной точности вычисления координат планет, Солнца и Луны.

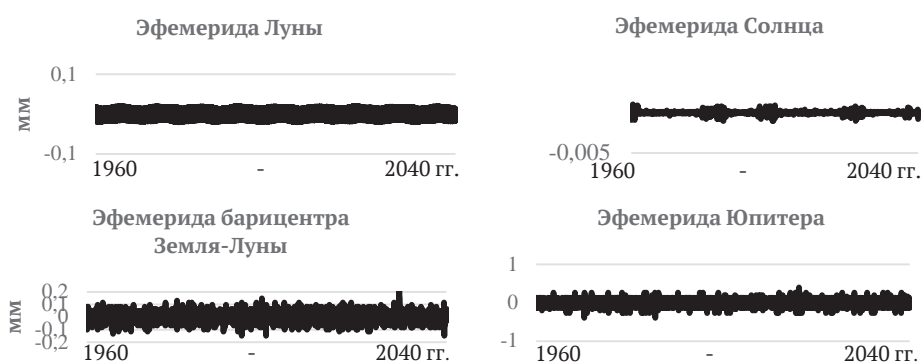


Рис. 3. Разности значений полиномов Чебышева для координат  $x$ ,  $y$  и  $z$  на концах подинтервалов аппроксимации

Для решения задач сопровождения системы ГЛОНАСС субмиллиметровая точность представления координат тел, возмущающих орбиты навигационных спутников, является избыточной. Если для стационарных и мобильных наземных приложений объем эфемеридных данных не является заметным, то для космических приложений [8] стоимость хранения таких данных может быть чрезмерной. Значительное сокращение объема эфемеридных данных может быть достигнуто варьированием степени и подинтервала аппроксимации чебышевских полиномов. В эфемеридах серии DE для Луны подинтервал аппроксимации равен четырем дням и может быть легко увеличен без значимого уменьшения точности вычисления лунных координат. Рис. 4 иллюстрирует, как меняется формальная точность аппроксимации коор-

динат Луны и барицентра системы Земля-Луна, если использовать только половину коэффициентов аппроксимирующих полиномов из стандартных разложений эфемерид серии DE.

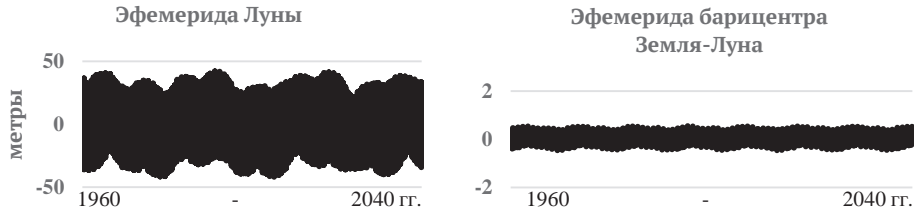


Рис. 4. Разности значений полиномов Чебышева для координат  $x$ ,  $y$  и  $z$  на концах подинтервалов аппроксимации и половине использованных коэффициентов

Степень допустимого сжатия эфемеридных данных зависит в основном от требуемой точности представления координат Луны, Солнца и планет для конкретного приложения.

### Заключение

1. Естественным выбором для сопровождения системы ГЛОНАСС и ее приложений является использование российских эфемерид ЕРМ, которые обеспечивают лицензионную чистоту и имеют такую же точность, как и эфемериды серии DE, за счет применения практически идентичных моделей и баз наблюдательных данных.

2. Разумный интервал обновления эфемеридных данных для целей сопровождения системы ГЛОНАСС составляет десятки лет, то есть сопоставим с жизненным циклом аппаратуры и программного обеспечения. В силу того, что для обновления эфемерид Луны, Солнца и планет требуется замена файлов с коэффициентами чебышевских аппроксимирующих полиномов, и не требуется изменений программного обеспечения, обновление эфемеридных данных может осуществляться и чаще, например, при каждом обновлении эфемерид ЕРМ.

3. Для отдельных приложений системы ГЛОНАСС, в частности для автономной навигации геостационарных космических аппаратов по сигналам СРНС [9], может потребоваться более компактное представление эфемерид Луны, Солнца и планет. Одним из возможных решений этой задачи может быть уменьшение объема данных путем минимизации отношения числа коэффициентов полинома к длине подинтервала аппроксимации при фиксированной допустимой ошибке по-

линомиального представления координат Луны, Солнца и планет. Потенциальное уменьшение объема эфемеридных данных для использования в приложениях системы ГЛОНАСС может достигать нескольких раз.

### Литература

1. *Williams J. G., Folkner W. M., Boggs D. H., Park R. S., Kuchinka Petr* The Planetary and Lunar Ephemeris DE 430 and DE431 // IPN Progress Report 42–196. — 2014.
2. *Fienga A., Laskar J., Kuchynka P., and al.* The INPOP10a planetary ephemeris and its applications in fundamental physics // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. — 2011. — Vol. 111, Is. 3. — P. 363–385.
3. *Путьева Е. В.* Фундаментальные эфемериды планет (ЕРМ) и их естественных спутников ИПА РАН и использование эфемерид для астронавигации и научных исследований // *Труды ИПА РАН*. — 2013. — Вып. 27. — С. 265–271.
4. *Васильев М. В., Ягудина Э. И.* Российская эфемерида Луны ЕРМ-ЕРА 2012 // *Астрон. вестник*. — 2014. — Вып. 48, № 2. — С. 169–176.
5. *Васильев М. В., Васильева Н. В., Михайлов Н. В.* Метод автономного долгосрочного прогноза эфемерид СРНС для радионавигационных приемников массового применения // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». — 2009. — С. 283–284.
6. *Васильев М. В., Ягудина Э. И.* Эфемериды Луны Солнца и больших планет для автономного прогноза движения навигационных спутников СРНС // *Труды ИПА РАН*. — 2013. — Вып. 27. — С. 404–407.
7. *Васильев М. В., Красинский Г. А.* Универсальная система программирования для эфемеридной и динамической астрономии // *Труды ИПА РАН*. — 1997. — Вып. 1. — С. 228–248.
8. *Fichter W., Bruder M., Gottzein E., Krauss P., Mitnacht M., Botchkovski A., Mikhailov N., Vasilev M.* Design of an embedded GPS receiver for space applications // *Space Technology-Abingdon*. — 2000. — Vol. 20, Is. 4. — P. 127–134.
9. *Vasilyev M.* Real time autonomous orbit determination of GEO satellite using GPS // *ION GPS'99*. — 1999. — P. 451–457.

## Intervals to Update the Data of the Moon, the Sun and Planet Positions for the Ephemeris Support of the GLONASS System

**M. V. Vasilyev, E. I. Yagudina**

The GLONASS system requires that its ephemeris support includes the data about the positions of the bodies which disturb the orbits of navigational satellites. The current ephemerides of the Moon, the Sun and the

planets are DE/LE (USA), INPOP (France) and EPM (Russia). All of them have the accuracy necessary to predict the ephemerides of navigational satellites of the Earth, including the GLONASS satellites. The ephemeris data are presented in the form of files with coefficients of Chebyshev approximating polynomials for the coordinates and velocities of the planets, the Sun and the Moon. However, each realization of these ephemerides is calculated using a fixed set of observational data and loses in accuracy of the coordinates of the perturbing bodies outside the observational interval. The speed of the accuracy degradation in the Moon, the Sun and the planets' positions is compared in a few DE/LE versions. The intervals between updates of the ephemeris of the Moon, the Sun and the planets are recommended for the GLONASS support and autonomous orbit determination of the navigation satellites.

**Keywords:** ephemerides of the Moon, the Sun and planets, ephemeris support of the GLONASS system, navigational satellite ephemerides, navigation equipment.