

ОБНОВЛЕННЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ ЭФЕМЕРИДЫ ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА

© 2019 г. Г. А. Космодамианский*

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 25.07.2019 г.; после доработки 04.09.2019 г.; принята к публикации 16.09.2019 г.

Представлены новые версии эфемерид галилеевых спутников Юпитера — Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто, построенные с использованием численного интегрирования уравнений движения спутников. Модель движения спутников учитывает несферичность Юпитера, взаимные возмущения спутников и возмущения от Солнца и больших планет. Начальные значения параметров движения спутников уточнены по всем доступным рядам наземных оптических наблюдений, покрывающих интервал 1891–2017 гг., наблюдениям космических аппаратов и радарным наблюдениям. В результате получены коэффициенты разложения координат и скоростей спутников в ряды по полиномам Чебышева на интервале 1891–2025 гг. Приведены среднеквадратические ошибки наблюдений и графики сравнения построенных эфемерид, как с наблюдениями, так и с численными эфемеридами Лэнея. Построенные эфемериды размещены в открытом доступе.

Ключевые слова: Солнечная система, эфемериды спутников.

DOI: 10.1134/S0320010819110044

ВВЕДЕНИЕ

Эфемериды спутников больших планет необходимы при планировании наблюдений, а также планировании полетов космических аппаратов к этим спутникам. Кроме того, наличие нескольких независимых эфемерид позволяет проводить их взаимный контроль.

В настоящее время наиболее точные эфемериды спутников, основанные на численном интегрировании уравнений движения, разрабатываются в Лаборатории реактивного движения (JPL, США) (Джейкобсон, 2001) и Институте небесной механики в Париже (Лэней, 2004а, 2004б).

Начиная с 2007 г. в ИПА РАН разрабатываются собственные численные теории движения естественных спутников планет с целью включения эфемерид этих объектов в приложения к “Астрономическому ежегоднику”, а также для уточнения орбит планет и самих спутников. Создание собственных независимых эфемерид позволяет своевременно проводить их уточнение с появлением новых наблюдений.

Предыдущие версии эфемерид галилеевых спутников (Порошина и др., 2012; Космодамианский, Порошина, 2014), были использованы при создании эфемерид ЕРМ2011 (Питьева, 2013) и

ЕРМ2015 (Питьева, 2017) для уточнения эфемериды Юпитера. Предполагается, что новая версия эфемерид, описанная в настоящей работе, так же будет использована для этой цели.

В настоящей работе представлена последняя версия численных эфемерид галилеевых спутников Юпитера — Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто, построенных на интервале 1891–2025 гг. и уточненных по всем доступным рядам наземных астрометрических наблюдений, проведенных на интервале 1891–2017 гг. Построение эфемерид проводилось при помощи программного пакета ЭРА-7 (Эфемеридные расчеты в астрономии) (Красинский, Васильев, 1997), разработанного сотрудниками ИПА РАН для решения различных задач динамической и эфемеридной астрономии. ЭРА-7 позволяет, как использовать уже готовые эфемериды планет и спутников, так и самостоятельно строить численные теории движения небесных тел.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Теории движения спутников были построены методом дифференциального уточнения параметров по нескольким последовательным итерациям, на каждой из которых проводилось численное интегрирование дифференциальных уравнений движения спутников методом Эверхарта 19-го порядка. Улучшенные методом наименьших квадратов по

*Электронный адрес: ga.kosmodamianskiy@iaaras.ru

Таблица 1. Уточненные начальные планетоцентрические координаты (R) и скорости (V) спутников на 2436204.5(TDB), на эпоху J2000.0

| Координаты | Ио | Европа | Ганимед | Каллисто |
|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| R_x , км | 304914.251 | 35946.405 | -1021142.663 | 1850494.265 |
| R_y , км | -264691.134 | -607550.736 | 292563.013 | 249215.808 |
| R_z , км | -121318.030 | -293415.847 | 123479.391 | 141608.863 |
| V_x , км/с | 12.027 | 13.622 | -3.226 | -1.215 |
| V_y , км/с | 11.206 | 0.617 | -9.388 | 7.373 |
| V_z , км/с | 5.529 | 0.591 | -4.478 | 3.491 |

результатам сравнения с наблюдениями начальные координаты и скорости служили начальными данными при новом интегрировании в следующей итерации. В результате интегрирования были получены коэффициенты разложения координат и скоростей спутников в ряды по полиномам Чебышева на период 1891–2025 гг. Уравнения движения и методика улучшения параметров подробно описаны в работе (Космодамианский, 2009).

При интегрировании уравнений движения спутников были учтены следующие факторы: взаимные возмущения спутников, возмущения от Солнца, Сатурна, Урана и Нептуна, а также несферичность Юпитера (J_2 , J_4 , J_6). При вычислении возмущений от Солнца и планет использовалась численная теория ЕРМ-2011, разработанная в ИПА РАН (Питьева, 2013). Для того чтобы минимизировать численные ошибки, интегрирование велось “вперед” и “назад” от даты 1 января 1958 г., близкой к середине интервала интегрирования. Начальные значения координат и скоростей спутников были вычислены на эту дату по эфемериде Лиске (1977).

В табл. 1 приведены начальные значения координат и скоростей спутников, полученные в данной работе после уточнения по наблюдениям.

В табл. 2 приведены гравитационные характеристики Юпитера и спутников, которые были использованы в данной работе. Обозначения в таблице: Gm — гравитационные массы объектов, R — экваториальный радиус Юпитера, J_2 , J_4 , J_6 — вторая, четвертая и шестая зональные гармоники разложения потенциала Юпитера. Значения параметров взяты на сайте JPL (https://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_phys_par, https://ssd.jpl.nasa.gov/?gravity_fields_op).

При вычислении гравитационного потенциала Юпитера использовались экваториальные угловые координаты северного полюса Юпитера на эпоху JD2451545.0, которые были взяты из последнего отчета Рабочей группы по картографическим координатам и элементам вращения (Арчиал и др., 2018) и записаны в следующем виде:

$$\alpha_0 = 268.056595 - 0.006499T + 0^\circ.000117 \sin Ja + 0^\circ.000938 \sin Jb + \\ + 0.001432 \sin Jc + 0.000030 \sin Jd + 0.002150 \cos Je,$$

$$\delta_0 = 64.495303 + 0.002413T + 0.000050 \cos Ja + 0.000404 \cos Jb + \\ + 0.000617 \cos Jc - 0.000013 \cos Jd + 0.000926 \cos Je,$$

$$W = 284.95 + 870.5360000d.$$

Здесь

$$J_a = 99^{\circ}.360714 + 4850^{\circ}.4046T, \quad J_b = 175^{\circ}.895369 + 1191^{\circ}.9605T,$$

$$J_c = 300^{\circ}.323162 + 262^{\circ}.5475T, \quad J_d = 114^{\circ}.012305 + 6070^{\circ}.2476T,$$

$$J_e = 49^{\circ}.511251 + 64^{\circ}.3000T,$$

где d — интервал в днях от стандартной эпохи, T — интервал в Юлианских столетиях (36 525 дней) от стандартной эпохи.

НАБЛЮДЕНИЯ

При уточнении параметров движения спутников были использованы все опубликованные на данный момент наземные фотографические и ПЗС-наблюдения спутников. Всего было использовано 17 647 астрометрических наблюдений разных типов, полученных в период 1891–2017 гг. Информация об использованных наблюдениях, краткое описание которых будет приведено ниже, дана в табл. 3–4, где для каждого спутника и обсерватории приведены период, количество (числа в соответствующей колонке, соединенные знаком “+”, обозначают количество наблюдений для каждого спутника) и тип наблюдений (абс. —

абсолютные позиционные наблюдения, отн. — относительные наблюдения), а также полученные после улучшения эфемерид среднеквадратическое ошибки (СКО) по прямому восхождению и склонению. В случае, если спутник не наблюдался, в колонках для прямых восхождений и склонений стоит прочерк. Значительная часть использованных наблюдений опубликована на эпоху и равноденствие В1950.0. Была проведена редукция этих наблюдений к эпохе и равноденствию J2000.0 по формулам, приведенным в работе Аоки и др. (1983). Большая часть наблюдений была получена благодаря сайту Центра данных естественных спутников планет (NSDC, <http://nsdb.imcce.fr/obspos/obsindhe.htm>) (Арло, Емельянов, 2009).

Наблюдения, проведенные в 1891–1936 гг. на обсерваториях в Гельсингфорсе, Пулково, Гринвиче, Дзо-Се (Китай), Париже, Бухаресте и Мысе Доброй Надежды, а так же наблюдения, проведенные в 1961–1978 гг. на обсерваториях в Бордо, Ла Силле, Рио-де-Жанейро, в обсерватории Мак-Кормика, на Йеркской обсерватории и Королевской обсерватории Бельгии в Уккле были взяты из каталога позиционных наблюдений спутников планет 1891–1978 гг., опубликованном Арло (1982). Всего в каталоге представлено 1138 наблюдений, каждое из которых дает положение на один момент времени сразу нескольких спутников относительно центра фотопластинки. Таким образом, всего представлено 3916 положений спутников. Точности этих наблюдений, в зависимости от обсерватории и периода наблюдений, лежат в пределах $0.05''$ – $0.6''$. Из-за сложностей с определением положения центра фотопластинки наблюдения были преобразованы таким образом, что в каждом наблюдении (которое дает положение нескольких спутников на один момент времени) был выбран опорный спутник, относительно которого были получены дифференциальные координаты остальных спутников. В результате были получены 3189 отдельных наблюдений дифференциального типа, которые и были использованы при улучшении теорий движения.

Таблица 2. Гравитационные параметры системы Юпитера

| Параметр | Значение |
|---|-----------------------|
| Gm_{system} , км ³ /с ² | 126712764.1 ± 2.7 |
| $Gm_{Jupiter}$, км ³ /с ² | 126686536.1 ± 2.7 |
| R , км | 71492 |
| $J_2 \times 10^{-6}$ | 14695.62 ± 0.29 |
| $J_4 \times 10^{-6}$ | -591.31 ± 2.06 |
| $J_6 \times 10^{-6}$ | 20.78 ± 4.87 |
| Gm_{Io} , км ³ /с ² | 5959.916 ± 0.012 |
| Gm_{Europa} , км ³ /с ² | 3202.739 ± 0.009 |
| $Gm_{Ganymede}$, км ³ /с ² | 9887.834 ± 0.017 |
| $Gm_{Callisto}$, км ³ /с ² | 7179.289 ± 0.013 |

Таблица 3. Позиционные наблюдения Ио и Европы

| Обсерватория | Тип набл. | Интервал наблюдений | Количество наблюдений | Ио СКО, угл. сек | | Европа СКО, угл. сек | |
|----------------|-----------|---------------------|-----------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|
| | | | | $\Delta\alpha \cos \delta$ | $\Delta\delta$ | $\Delta\alpha \cos \delta$ | $\Delta\delta$ |
| Washington | абс. | 1967–1998 | 1210 + 1248 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| Flagstaff | абс. | 1998–2015 | 504 + 638 | 0.11 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| Nikolaev | абс. | 1979–2014 | 303 + 330 | 0.18 | 0.18 | 0.17 | 0.16 |
| Pulkovo | абс. | 1974–1994 | 136 + 161 | 0.32 | 0.25 | 0.29 | 0.27 |
| Pulkovo | абс. | 2009–2017 | 260 + 302 | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.08 |
| Pulkovo | отн. | 1976–2005 | 172 + 190 | 0.15 | 0.16 | 0.14 | 0.19 |
| Pulkovo | отн. | 1984–1986 | 37 + 50 | 0.13 | 0.21 | 0.10 | 0.20 |
| Pulkovo | отн. | 1974–1994 | 255 + 250 | 0.23 | 0.50 | 0.19 | 0.61 |
| Pulkovo | отн. | 1986–2005 | 9 + 61 | 0.04 | 0.07 | 0.08 | 0.11 |
| Pulkovo | отн. | 2013–2017 | 403 + 336 | 0.07 | 0.08 | 0.06 | 0.10 |
| Itajuba | отн. | 1995 | 122 + 122 | 0.09 | 0.03 | 0.17 | 0.05 |
| Yunnan | отн. | 2002–2010 | 435 + 20 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.02 |
| HIPPARCOS | абс. | 1990–1992 | 64 | – | – | 0.11 | 0.08 |
| Hubble ST | отн. | 1994–1997 | 32 + 4 | 0.07 | 0.07 | 0.04 | 0.08 |
| PHEMU | отн. | 1973–2015 | 779 + 625 | 0.05 | 0.07 | 0.04 | 0.06 |
| Bourdeaux | отн. | 1967–1974 | 142 + 144 | 0.35 | 0.34 | 0.34 | 0.34 |
| Bucarest | отн. | 1934 | 65 + 66 | 0.24 | 0.28 | 0.24 | 0.32 |
| Cape | отн. | 1924 | 84 + 86 | 0.09 | 0.14 | 0.11 | 0.16 |
| Greenwich | отн. | 1918–1919 | 91 + 92 | 0.08 | 0.17 | 0.08 | 0.24 |
| Helsingfors | отн. | 1891–1897 | 208 + 200 | 0.20 | 0.15 | 0.17 | 0.13 |
| La Silla | отн. | 1978 | 57 + 45 | 0.23 | 0.24 | 0.19 | 0.19 |
| McCormick | отн. | 1977–1978 | 162 + 179 | 0.22 | 0.11 | 0.17 | 0.14 |
| Paris | отн. | 1936 | 29 + 20 | 0.32 | 0.33 | 0.23 | 0.39 |
| Pulkovo | отн. | 1895–1910 | 332 + 319 | 0.16 | 0.16 | 0.15 | 0.15 |
| Rio de Janeiro | отн. | 1977 | 8 + 16 | 0.47 | 0.40 | 0.38 | 0.33 |
| Uccle | отн. | 1977–1978 | 35 + 37 | 0.34 | 0.43 | 0.35 | 0.39 |
| Yerkes | отн. | 1961–1963 | 30 + 33 | 0.32 | 0.39 | 0.28 | 0.29 |
| Zo–Se | отн. | 1917–1918 | 8 + 18 | 0.25 | 0.32 | 0.33 | 0.29 |

Таблица 4. Позиционные наблюдения Ганимеда и Каллисто

| Обсерватория | Тип набл. | Интервал наблюдений | Количество наблюдений | Ганимед СКО, угл. сек | | Каллисто СКО, угл. сек | |
|----------------|-----------|---------------------|-----------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|
| | | | | $\Delta\alpha \cos \delta$ | $\Delta\delta$ | $\Delta\alpha \cos \delta$ | $\Delta\delta$ |
| Washington | абс. | 1967–1998 | 1324 | 0.13 | 0.12 | – | – |
| Flagstaff | абс. | 1998–2015 | 721 + 756 | 0.13 | 0.13 | 0.10 | 0.11 |
| Nikolaev | абс. | 1979–2014 | 339 + 339 | 0.17 | 0.15 | 0.14 | 0.14 |
| La Palma | абс. | 1992–1997 | 218 + 440 | 0.19 | 0.21 | 0.19 | 0.19 |
| Pulkovo | абс. | 1974–1994 | 161 + 155 | 0.28 | 0.28 | 0.22 | 0.27 |
| Pulkovo | абс. | 2009–2017 | 305 + 353 | 0.09 | 0.10 | 0.08 | 0.08 |
| Pulkovo | отн. | 1976–2005 | 187 + 162 | 0.15 | 0.20 | 0.16 | 0.25 |
| Pulkovo | отн. | 1984–1986 | 48 + 50 | 0.11 | 0.32 | 0.15 | 0.47 |
| Pulkovo | отн. | 1974–1994 | 216 + 252 | 0.24 | 0.63 | 0.27 | 0.86 |
| Pulkovo | отн. | 1986–2005 | 97 + 89 | 0.08 | 0.11 | 0.09 | 0.14 |
| Pulkovo | отн. | 2013–2017 | 207 + 35 | 0.06 | 0.09 | 0.09 | 0.10 |
| Itajuba | отн. | 1995 | 85 + 35 | 0.13 | 0.05 | 0.09 | 0.07 |
| Yunnan | отн. | 2002–2010 | 71 | 0.01 | 0.02 | – | – |
| HIPPARCOS | абс. | 1990–1992 | 16 + 13 | 0.11 | 0.04 | 0.09 | 0.06 |
| Hubble ST | отн. | 1994–1997 | 1 + 10 | 0.07 | 0.09 | 0.03 | 0.02 |
| PHEMU | отн. | 1973–2015 | 501 + 191 | 0.05 | 0.07 | 0.04 | 0.07 |
| Bourdeaux | отн. | 1967–1974 | 50 + 26 | 0.34 | 0.41 | 0.33 | 0.41 |
| Bucarest | отн. | 1934 | 17 + 39 | 0.24 | 0.26 | 0.31 | 0.34 |
| Cape | отн. | 1924 | 13 + 31 | 0.08 | 0.13 | 0.11 | 0.17 |
| Greenwich | отн. | 1918–1919 | 15 + 23 | 0.07 | 0.28 | 0.10 | 0.22 |
| Helsingfors | отн. | 1891–1897 | 43 + 56 | 0.19 | 0.17 | 0.14 | 0.15 |
| La Silla | отн. | 1978 | 15 + 9 | 0.24 | 0.24 | 0.22 | 0.20 |
| McCormick | отн. | 1977–1978 | 35 + 90 | 0.18 | 0.09 | 0.20 | 0.11 |
| Paris | отн. | 1936 | 5 + 5 | 0.23 | 0.34 | 0.28 | 0.52 |
| Pulkovo | отн. | 1895–1910 | 73 + 90 | 0.16 | 0.18 | 0.17 | 0.19 |
| Rio de Janeiro | отн. | 1977 | 5 + 2 | 0.32 | 0.54 | 0.21 | 0.42 |
| Uccle | отн. | 1977–1978 | 8 + 14 | 0.33 | 0.29 | 0.28 | 0.34 |
| Yerkes | отн. | 1961–1963 | 7 + 7 | 0.48 | 0.38 | 0.33 | 0.42 |
| Zo–Se | отн. | 1917–1918 | 2 + 3 | 0.08 | 0.10 | 0.09 | 0.30 |

Таблица 5. Радарные наблюдения

| Спутник | Дата | Время | τ , с | $O - C$, мс (ЕЗ) | $O - C$, мс |
|----------|------------|-------|-------------|--------------------|--------------|
| Ганимед | 1992 02 20 | 05 57 | 4413.296899 | 0.849 ± 0.048 | -0.169 |
| Ганимед | 1992 03 09 | 04 37 | 4417.270238 | -0.729 ± 0.021 | -0.023 |
| Каллисто | 1992 03 03 | 05 05 | 4394.993673 | 1.413 ± 0.087 | 0.747 |
| Каллисто | 1992 03 07 | 04 46 | 4402.260207 | -1.386 ± 0.090 | -1.189 |

3782 наблюдения получены на Военно-Морской обсерватории США в Вашингтоне в 1967–1998 гг. при помощи длиннофокусного рефрактора. Точность этих наблюдений составляет $0.1''$ (Арло и др., 2016).

2619 наблюдений были получены в 1998–2015 гг. на автоматическом транзитном телескопе во Флагстаффе в рамках наблюдательной программы планет и спутников FASTT (Flagstaff Astrometric Scanning Transit Telescope). Точность этих наблюдений составляет $0.05''$ – $0.1''$ (Стоун, Харрис, 2000; Стоун, 2000, 2001).

4939 наблюдений 1974–2017 гг. были взяты в базе наблюдений на сайте Пулковской обсерватории (<http://puldb.ru/db2/sdb.php>). Эти наблюдения были выполнены на различных инструментах: 26-дюймовом рефракторе, нормальном астрографе, лунно-планетном телескопе и двойном астрографе. Точность фотографических наблюдений, выполненных в период 1974–2005 гг., составляет $0.1''$ – $0.5''$. Необходимо отметить высокую точность современных пулковских ПЗС-наблюдений спутников (Нарижная, 2015, 2016; Нарижная и др., 2018), которая составляет $0.08''$.

364 положения всех четырех спутников относительно Юпитера получены в Итаджубе (Бразилия) в 1995 г. (Вейга, Визэйра, 1996). Точность этих наблюдений составляет порядка $0.1''$.

Использовано 526 относительных положений спутников, полученных в Юннаньской Обсерватории в Китае в 2002–2010 гг. Эти наблюдения представляют собой наблюдения близких пар спутников и обладают высокой точностью — $0.03''$ по обеим координатам (Пенг и др., 2012).

В 1973 г. были начаты фотометрические наблюдения взаимных явлений и покрытий в системе спутников Юпитера, и с тех пор международные кампании по наблюдениям этих явлений (РНЕМУ) проводятся каждые шесть лет при участии обсерваторий по всему миру. Данные наблюдения являются источником очень точных астрометрических

данных — $0.05''$, получаемых из обработки кривых блеска спутников. Астрометрическая обработка фотометрических наблюдений взаимных затмений и покрытий галилеевых спутников, полученных в 1973, 1979–1980, 1985, 1990–1992 гг., проведена в работах (Акснес и др., 1984; Франклин и др., 1991; Каас и др., 1999). Оригинальный метод обработки фотометрических наблюдений взаимных явлений с целью получения из них астрометрических данных разработан Н.В. Емельяновым (2003). Полученные по этому методу астрометрические данные из наблюдений, проведенных в 1997, 2002–2003, 2009 и 2014–2015 гг., приведены в работах (Емельянов, Вашковьяк, 2009; Емельянов, 2009; Арло и др., 2014; Сакет и др., 2018). В табл. 3 и 4 для этих наблюдений в колонке “Обсерватория” стоит обозначение РНЕМУ.

Помимо наземных наблюдений, в работе также были использованы наблюдения, выполненные с борта космических аппаратов: 47 положений спутников относительно Юпитера, полученные при помощи космического телескопа им. Хаббла (Маллама и др., 2004), точность которых составляет $0.04''$ по обеим координатам, и 93 абсолютных положения спутников, выполненные космическим аппаратом Hipparcos (Хестроффер и др., 1998; Пэрриман, 1997), точность которых составляет $0.03''$ – $0.2''$.

Кроме того, были использованы четыре радарных наблюдения Ганимеда и Каллисто, полученные в обсерватории Аресибо в 1992 г. (Хармон и др., 1994). Данные по этим наблюдениям приведены в табл. 5 и включают дату и время получения сигнала (в часах и минутах), время распространения сигнала между радаром и спутником τ , а также значения ($O - C$) с погрешностями, полученные авторами этих наблюдений в сравнении с эфемеридой ЕЗ, разработанной Лиске. В последнем столбце приведены значения ($O - C$) после улучшения, полученные в данной работе.

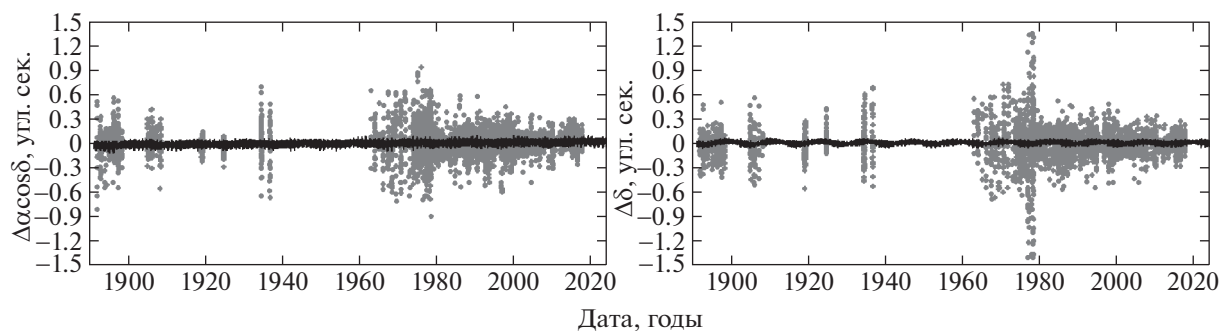


Рис. 1. Сравнение с наблюдениями и эфемеридой V. Lainey-V.2.0|V1.1 для Ио.

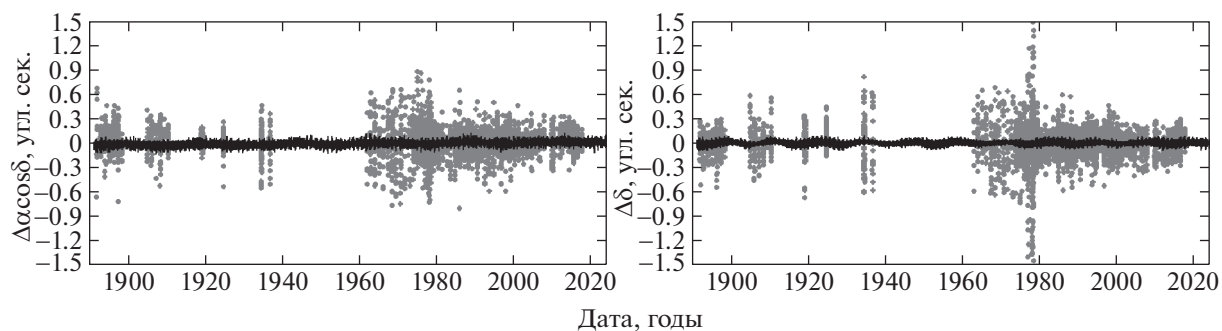


Рис. 2. Сравнение с наблюдениями и эфемеридой V. Lainey-V.2.0|V1.1 для Европы.

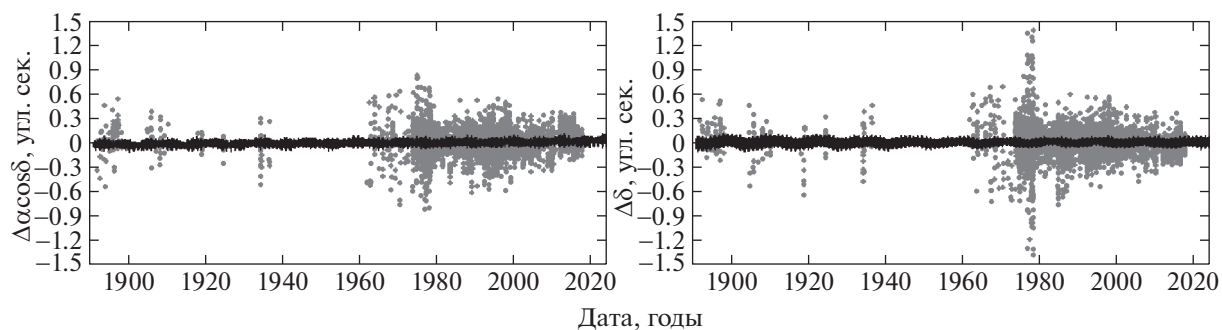


Рис. 3. Сравнение с наблюдениями и эфемеридой V. Lainey-V.2.0|V1.1 для Ганимеда.

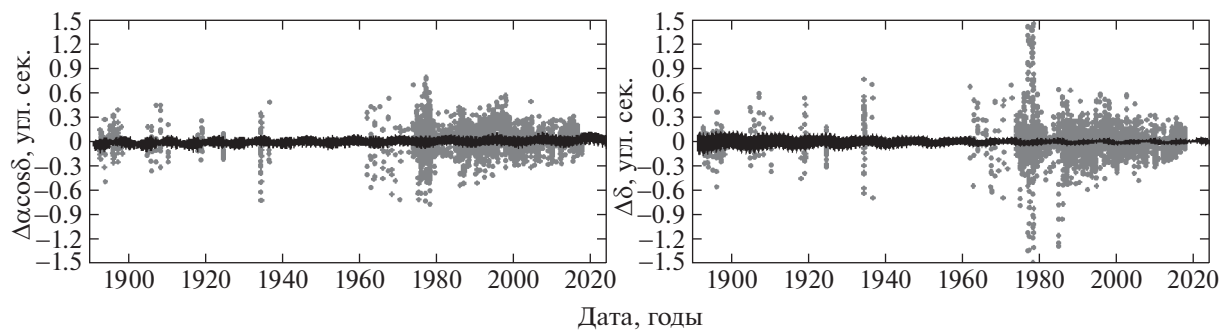


Рис. 4. Сравнение с наблюдениями и эфемеридой V. Lainey-V.2.0|V1.1 для Каллисто.

ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ

В табл. 3 и 4 для каждого спутника и обсерватории представлены среднеквадратические ошибки представления наблюдений. В целом видно, что для всех наблюдений полученные среднеквадратические ошибки соответствуют точностям, которые даются авторами наблюдений, и приведенным в разделе с описанием наблюдений. В частности, как и следовало ожидать, наилучшим образом представлены наблюдения взаимных явлений, наблюдения, выполненные в рамках программы FASTT, современные пулковские наблюдения.

На рис. 1–4 приведены значения ($O-C$) после улучшения (серые точки) по прямому восхождению и склонению для каждого спутника. Кроме того, на этих же рисунках приведены графики сравнения построенных эфемерид с численными эфемеридами Лэнея и др. (2004а, 2004б) (черные линии). Сравнение проводилось на интервале 1891–2025 гг. по прямому восхождению и склонению для каждого спутника. Эфемериды Лэнея, а также эфемериды других авторов, доступны благодаря серверу MULTY-SAT (Емельянов, Арло, 2008) на сайте Службы естественных спутников планет ГАИШ МГУ (<http://www.sai.msu.ru/neb/nss/nssephmr.htm>). На рисунках видно, что расхождение между эфемеридами для Ио, Европы и Ганимеда на всем интервале не превосходит $0.1''$, а для Каллисто — $0.15''$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря использованию всех доступных на данный момент наземных наблюдений галилеевых спутников Юпитера, покрывающих период 1891–2017 гг., построены численные эфемериды этих спутников на интервале 1891–2025 гг. Сравнение показало хорошее согласие как с наблюдениями, так и с эфемеридами других авторов. Построенные теории галилеевых спутников используются для вычисления эфемеридных таблиц, ежегодно публикуемых на сайте ИПА РАН в приложении к “Астрономическому ежегоднику” (<http://iaaras.ru/about/issues/yearbook/>), а также доступны для пользователей на сайте ИПА РАН благодаря Интерактивной службе расчета эфемерид, разработанной в ИПА РАН и предоставляющей доступ к различным эфемеридам с возможностью получения эфемеридных таблиц в различных единицах измерения и системах координат (<http://iaaras.ru/dept/ephemeris/online/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аоки и др. (S. Aoki, M. Soma, H. Kanoshita, K. Inoue), *Astron. Astrophys.* **128**, 263 (1983).
2. Акснес и др. (K. Aksnes, F. Franklin, R. Mills, P. Birch, C. Blanco, S. Catalano, J. Piironen), *Astron. J.* **89**, 280 (1984).
3. Арло (J.-E. Arlot), *Amelioration des ephemerides des satellites galileens de Jupiter par l'analyse des observations. These de Doctorat d'etat (Obs. de Paris, 1982).*
4. Арло, Емельянов (J.-E. Arlot and N.V. Emelyanov), *Astron. Astrophys.* **503**, 631 (2009).
5. Арло и др. (J.-E. Arlot, N. Emelyanov, M.I. Varfolomeev, A. Amosse, C. Arena, M. Assafin, L. Barbieri, S. Bolzoni, et al.), *Astron. Astrophys.* **572**, A120 (2014).
6. Арло и др. (J.-E. Arlot, N. Cooper, N. Emelyanov, V. Lainey, L.E. Meunier, C. Murray, J. Oberst, D. Pascu, et al.), *Not. Sci. Tech. Inst. Mecan. Celest.* **105** (2016)
7. Арчинал и др. (B.A. Archinal, C.H. Acton, M.F. A'Hearn, A. Conrad, G.J. Consolmagno, T. Duxbury, D. Hestroffer, J.L. Hilton, et al.), *Celest. Mech. Dyn. Astron.* **130**, 22 (2018).
8. Вейга, Визейра (C.H. Veiga, M.R. Vieira), *Rev. Mex.* **4**, 118 (1996).
9. Джейкобсон (R.A. Jacobson), *Bull. Am. Astron. Soc.* **33**, 1039 (2001).
10. Емельянов Н.В. *Астрон. вест.* **37**, 344 (2003) [N.V. Emelyanov, *Solar System Res.* **37**, 314 (2003)].
11. Емельянов Н.В., Вашковьяк С.Н. *Астрон. вест.* **43**, 251 (2009) [N.V. Emelyanov, S.N. Vashkovyakov, *Solar System Res.* **43**, 240 (2009)].
12. Емельянов (N.V. Emelyanov), *MNRAS*, **394**, 1037 (2009).
13. Емельянов, Арло (N.V. Emelyanov, J.-E. Arlot), *Astron. Astrophys.* **487**, 759 (2008).
14. Каас и др. (A.A. Kaas, K. Aksness, F. Franklin and Jay Lieske), *Astron. J.* **117**, 1933 (1999).
15. Красинский, Васильев (G.A. Krasinsky and M.V. Vasilyev), *Proc. of IAU Coll.* (Ed. I.M. Wyrzyszczak, J.H. Lieske, R.A. Feldman, Dordrecht, Kluwer, 1997), p. 239.
16. Космодамианский Г.А. *Астрон. вестн.* **43**, № 6, 483 (2009) [G.A. Kosmodamianskii, *Solar System Res.* **43**, № 6, 483 (2009)].
17. Космодамианский Г.А., Порошина А.Л. *Тр. ИПА* **31**, 39 (2014)
18. Лиске (J.H. Lieske), *Astron. Astrophys.* **56**, 333 (1977)
19. Лэней и др. (V. Lainey, L. Duriez, A. Vienne), *Astron. Astrophys.* **420**, 1171 (2004а).
20. Лэней и др. (V. Lainey, J.E. Arlot, A. Vienne), *Astron. Astrophys.* **427**, 371 (2004б).
21. Маллама и др. (A. Mallama, M. Aelion, C.A. Mallama), *Icarus* **167**, 320 (2004)
22. Нарижная Н.В. *Астрон. вестн.* **49**, 420 (2015) [N.V. Narizhnaya, *Solar System Res.* **49**, 383 (2015)].
23. Нарижная Н.В. *Астрон. вестн.* **50**, 364 (2016) [N.V. Narizhnaya, *Solar System Res.* **50**, 344 (2016)].

24. Нарижная Н.В., Ховричев М.Ю., Апетян А.А., Бикулова Д.А., Ершова А.П., Беляев И.А., Куликова А.М., Оськина К.И. и др., *Астрон. вестн.* **52**, 316 (2018) [N.V. Narizhnaya, M.Y. Khovrichev, A.A. Apetyan, D.A. Bikulova, A.P. Ershova, I.A. Balyaev, A.M. Kulikova, K.I. Os'kina, et al., *Solar System Res.* **52**, 312 (2018)].
25. Пенг и др. (Q.Y. Peng, H.F. He, V. Lainey, and A. Vienne), *MNRAS* **419**, 1977 (2012).
26. Питьева Е.В., *Астрон. вестн.* **47**, 419 (2013) [E.V. Pitjeva, *Solar System Res.* **47**, 386 (2013)].
27. Питьева Е.В., *Тр. ИПА* **43**, 42 (2017).
28. Пэрриман (M.A.C. Perryman), *The Hipparcos and Tycho Catalogues. Vol. 1: Introduction and Guide to the Data* (Noordwijk, ESA Publications Division, 1997).
29. Порошина и др. (A. Poroshina, M. Zamarashkina, G. Kosmodamianskiy), *Тр. ИПА* **26**, 75 (2012).
30. Сакет и др. (E. Saquet, N. Emelyanov, V. Robert, J.-E. Arlot, P. Anbazhagan, K. Bailli, J. Bardecker, A.A. Berezhnoy, et al.), *MNRAS* **474**, 4730 (2018).
31. Стоун, Харрис (R.C. Stone and F.H. Harris), *Astron. J.* **119**, 1985 (2000).
32. Стоун (R.C. Stone), *Astron. J.* **120**, 2124 (2000).
33. Стоун (R.C. Stone), *Astron. J.* **122**, 2723 (2001).
34. Франклин и др. (F. Franklin, J. Africano, W. Allen, K. Aksnes, P. Birch, C. Blanco, I. Coulson, J. Goguen, et al.), *Astron. J.* **102**, 806 (1991).
35. Хармон и др. (J.K. Harmon, S.J. Ostro, J.F. Chandler, and R.S. Hudson), *Astron. J.* **107**, 1175 (1994).
36. Хэстроффер и др. (D. Hestroffer, B. Morando, E. Hog, J. Rjvalevsky, L. Lindegren, and F. Mignard), *Astron. Astrophys.* **334**, 325 (1998).